EVOLUCIÓN

Sociedad, ciencia y universo

Andrew C. Fabian (Ed.)

Stephen Jay Gould, Martin Rees, Freeman Dyson, Lewis Wolpert, Richard Rogers, Jared Diamond, Gilliam Beer, Tim Ingold

METATEMAS 68



LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA



Si, en biología, evolución sólo significa evolución genética, en otras disciplinas el concepto se asocia a un proceso de cambio o desarrollo, a veces con una gradualidad implícita que la distingue de la revolución. **Andrew Fabian** reunió a ocho célebres divulgadores de distintas disciplinas en la décima serie de conferencias del **Darwin College**, celebrada a principios del año 1995 en la Universidad de Cambridge, y les pidió que abordaran la idea de la evolución y su importancia en las diferentes ramas del saber.

Así, **Gould** trata del concepto darwiniano de evolución en la tradición inglesa de observación de especies; **Wolpert** estudia cómo surgieron las criaturas multicelulares mediante la modificación (genética) del desarrollo del embrión; **Diamond** considera las divisiones políticas actuales como fruto de la historia humana desde la última edad del hielo; **Ingold** insiste en que el punto de partida más prometedor para unificar las ciencias biológicas es la biología del desarrollo; **Rees** describe la evolución del universo como un proceso de desplegamiento en el que las condiciones iniciales fueron decisivas; **Dyson** muestra cómo surgen la especiación y la simbiosis en el universo físico, y argumenta que las revoluciones producidas por instrumentos son mucho más comunes que las basadas en cambios conceptuales; **Rogers**, al tratar de la evolución de las ciudades, se centra en la evolución de Londres como un proceso de cambio acumulativo; y **Beer** plantea que en un género literario como la novela sólo cabe el concepto de evolución en el sentido de desarrollo progresivo.



Andrew C. Fabian (Ed.)

EVOLUCIÓN

SOCIEDAD, CIENCIA Y UNIVERSO

Metatemas 68

ePub r1.0

AlNoah 02.02.14

Título original: *Evolution. Society, Science and Universe*

Andrew C. Fabian (ed.) & Stephen Jay Gould & Freeman Dyson & Martin Rees & Lewis Wolpert & Richard Rogers & Jared Diamond & Gilliam Beer & Tim Ingold, 1998

Traducción: Néstor Herrán

Ilustración de portada: Miika Ahvenjarvi

Diseño de portada: AlNoah

Editor digital: AlNoah

Escaneo: TaliZorah

ePub base r1.0








Introducción

Andrew C. Fabian

ANDREW FABIAN, miembro de la Royal Society, es catedrático de investigación de la Royal Society británica en la universidad de Cambridge y miembro del Darwin College. Investiga en astronomía y sus intereses principales son las galaxias activas y los cúmulos galácticos. Organizó la primera serie de conferencias del Darwin College, titulada «Orígenes».

El concepto de evolución no tiene el mismo significado para todo el mundo. Mientras que en biología sólo significa evolución genética, muchas disciplinas la asocian a un proceso de cambio o desarrollo, a veces con una gradualidad implícita que la distingue de la revolución.

Esta recopilación de ensayos es el resultado de la convocatoria de ocho divulgadores célebres, procedentes de distintas disciplinas, para tratar el tema de la evolución. Como se verá, la mayoría explica cómo se ha llegado al actual estado de la cuestión: el concepto darwiniano de evolución en la conferencia de Stephen Jay Gould; las células y el embrión en la de Lewis Wolpert; las divisiones políticas actuales (a grandes rasgos) en la de Jared Diamond; la sociedad en la de Tim Ingold; el universo en la de Martin Rees, y la ciencia en la de Freeman Dyson. Richard Rogers, al tratar de la evolución de las ciudades, se centra en el estado actual de Londres, mientras que Gillian Beer plantea que la novela no ha evolucionado en absoluto y relata cómo ha calado el concepto de evolución en la literatura de ficción.

Los ensayos de este libro se leyeron por primera vez en la décima serie de conferencias del Darwin College, celebrada a principios del año 1995. Estas conferencias se han convertido en una institución para algunos en Cambridge y están abiertas (con gran éxito de asistencia) tanto a los miembros del colegio universitario y de la universidad como al público en general. Para garantizar la interdisciplinariedad de las conferencias se selecciona un grupo de divulgadores famosos, procedentes principalmente del mundo académico, y se les pide que hablen de un tema concreto. Hasta el momento se han tratado los temas «Orígenes», «La fragilidad del medio ambiente», «Predicciones», «Comunicación», «Inteligencia», «Catástrofes», «Color» y «Evolución». (La mejor manera de apreciar el resultado es consultar otros volúmenes de la serie, publicados por Cambridge University Press.) Entre los autores renombrados que han participado en estas conferencias se encuentran Noam Chomsky, Stephen Hawking, Roger Penrose, John Maynard Smith, Desmond Tutu, Helena Kennedy, Robert May, Richard Gregory, Daniel Dennett, David Lodge, Roy Porter, Bridget Riley y Chistopher Zeeman.

Para salvaguardar el carácter de cada disciplina, los conferenciantes no saben qué han dicho o escrito los otros. Por otra parte, las formas de impartir una conferencia varían tanto como los estilos literarios. En general, las conferencias de los científicos utilizan más elementos visuales (ilustraciones y gráficos) y son más improvisadas que las charlas sobre arte, ciencias sociales y humanidades. Al estar dirigidas a una audiencia muy amplia, las conferencias son en general inteligibles por los no especialistas. De esta forma esperamos poder comunicar algo de la emoción que acompaña la creación intelectual en diversas disciplinas.

Aunque el mecanismo de la evolución darwiniana apenas se cuestiona en los capítulos que siguen, sí se hacen críticas puntua-

les de algunas interpretaciones recientes (el neodarwinismo y el ultradarwinismo) y se constata que, a medida que nos alejamos de las ciencias físicas y biológicas y nos acercamos a las sociales, crece la impresión de que la vida no puede reducirse a esquemas simples.

STEPHEN JAY GOULD argumenta que el mecanismo de evolución por adaptación hunde sus raíces en la tradición de la historia natural inglesa. Esta tradición, en cuyo seno trabajó Darwin, hacía hincapié en el estudio de los detalles y del buen diseño; sus orígenes se remontan a la obra de Robert Boyle en el siglo XVII.

LEWIS WOLPERT explica que la evolución avanza mediante la modificación (genética) del desarrollo del embrión, en cuyo ámbito el factor más importante es el crecimiento diferencial. A continuación examina cómo surgieron las criaturas pluricelulares, los huevos y los embriones.

JARED DIAMOND describe a grandes rasgos la historia humana desde la última glaciación. ¿Por qué los europeos se extendieron por América a partir del siglo XV? ¿Por qué los incas no invadieron Europa? Diamond afirma que la clave está en la disponibilidad de plantas cultivables y animales de gran tamaño domesticables, lo cual depende en grado sumo de la geografía. Si una masa de tierra (Eurasia) tiene un eje este-oeste amplio a una misma latitud, entonces es posible transplantar con éxito plantas y animales. Esto permite el desarrollo de la agricultura y las grandes civilizaciones. Las sociedades populosas inventan nuevas armas, y los animales domesticados transmiten enfermedades. Con armas, medios de transporte e inmunidad a sus propios gérmenes, los invasores son imparables.

RICHARD ROGERS considera que la evolución de una ciudad como Londres es un proceso de cambio acumulativo que no puede dejarse en manos de mutaciones aleatorias. Londres es una

ciudad postindustrial que se enfrenta a las consecuencias de un crecimiento económico desenfrenado. Muchos espacios públicos famosos son poco más que rotondas para el tráfico. Rogers argumenta que puede desarrollarse una ciudad sostenible consolidando a su alrededor barrios urbanos compactos.

TIM INGOLD cree que el punto de partida más prometedor para unificar las ciencias biológicas y las sociales no es la «descendencia con modificación» de Darwin, sino la biología del desarrollo. Se pronuncia contra la idea de que la vida social sea el producto de un proceso de selección; las capacidades humanas no están especificadas de antemano, sino que surgen a través de la evolución conjunta con otras personas y, en particular, de la interacción con las generaciones precedentes.

GILLIAN BEER encuentra que la idea de evolución aplicada a la novela suele suponer un desarrollo ascendente, y argumenta contra este punto de vista. Las novelas que sobreviven no son las intrínsecamente mejores, sino las más aptas para sobrevivir. A continuación examina la utilización de la idea de evolución por los novelistas.

FREEMAN DYSON aborda la evolución de la ciencia mediante algunos relatos, principalmente sobre astronomía, que ilustran procesos evolutivos, y expone cómo surgen la especiación y la simbiosis en el universo físico. Es bien sabido que el conocimiento científico experimenta revoluciones; Dyson argumenta que las revoluciones propiciadas por instrumentos son mucho más comunes que las conceptuales, aunque estas últimas sean más conocidas.

MARTIN REES describe la evolución del universo como un proceso de desplegamiento. Primero nos conduce desde el Big Bang hasta la formación de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio en los núcleos de estrellas y supernovas. A continuación

se pregunta por qué las constantes físicas, las fuerzas de las interacciones y otros parámetros tienen los valores que tienen. También discute la idea de los universos múltiples, entre los cuales el nuestro sería uno más, con unos valores característicos de las constantes físicas que permiten la existencia y la evolución de la vida. Esto nos devuelve al punto de partida y sugiere que la evolución no es más que la última fase de un proceso físico, más fundamental, de despliegue en un metauniverso.

La impresión final es que el concepto de evolución no está fijado en un sentido interdisciplinar, pero es un tema fundamental que no puede ignorarse.

Para finalizar, me gustaría dar las gracias al director y a los miembros del Darwin College por permitirme organizar esta serie de conferencias, a todos los académicos y estudiantes que me han ayudado a preparar este ciclo y, en particular, a Joyce Graham por su útil asistencia.

Sobre la transmutación de la ley de Boyle en la revolución darwiniana

Stephen Jay Gould

STEPHEN JAY GOULD ocupa la cátedra Alexander Agassiz de Zoología y es profesor de geología en la Universidad de Harvard. También es conservador de la sección de paleontología de invertebrados en el Museo de Zoología Comparada de Harvard. Ha escrito extensamente sobre diversos aspectos de la ciencia evolutiva tanto en libros técnicos como de divulgación.

Continuidad adaptativa

Es posible que Inglaterra deje de existir algún día (sobre todo si consideramos las escalas temporales que manejan los paleontólogos), pero unas pocas millas de Canal y cerca de mil años sin invasiones a gran escala (desde el año 1066)[1] han generado una plétora de peculiaridades británicas, tanto temperamentales como filosóficas, respecto de las preferencias y formas de pensar del continente europeo. (Un lenguaje común, separado por 5000 kilómetros de océano, inspira más proximidad que los 40 kilómetros del canal de La Mancha y la diferencia de idioma; de ahí el parecido entre las historias del pensamiento evolutivo en Norteamérica y Gran Bretaña.) En este capítulo argumentaré que la adaptación es el tema de historia natural y evolución más característico de los países de habla inglesa. Intentaré demostrar que la

decisión de Charles Darwin (figura 1) de basar su defensa de la evolución y su modo de acción en una explicación de la adaptación encaja con una larga tradición de la historia natural y la teología británicas que nunca llamó la atención en el continente. Las disputas actuales entre las teorías «ultradarwinistas» y estructuralistas prolongan el mismo debate y establecen una continuidad típicamente inglesa que dura ya varios siglos.

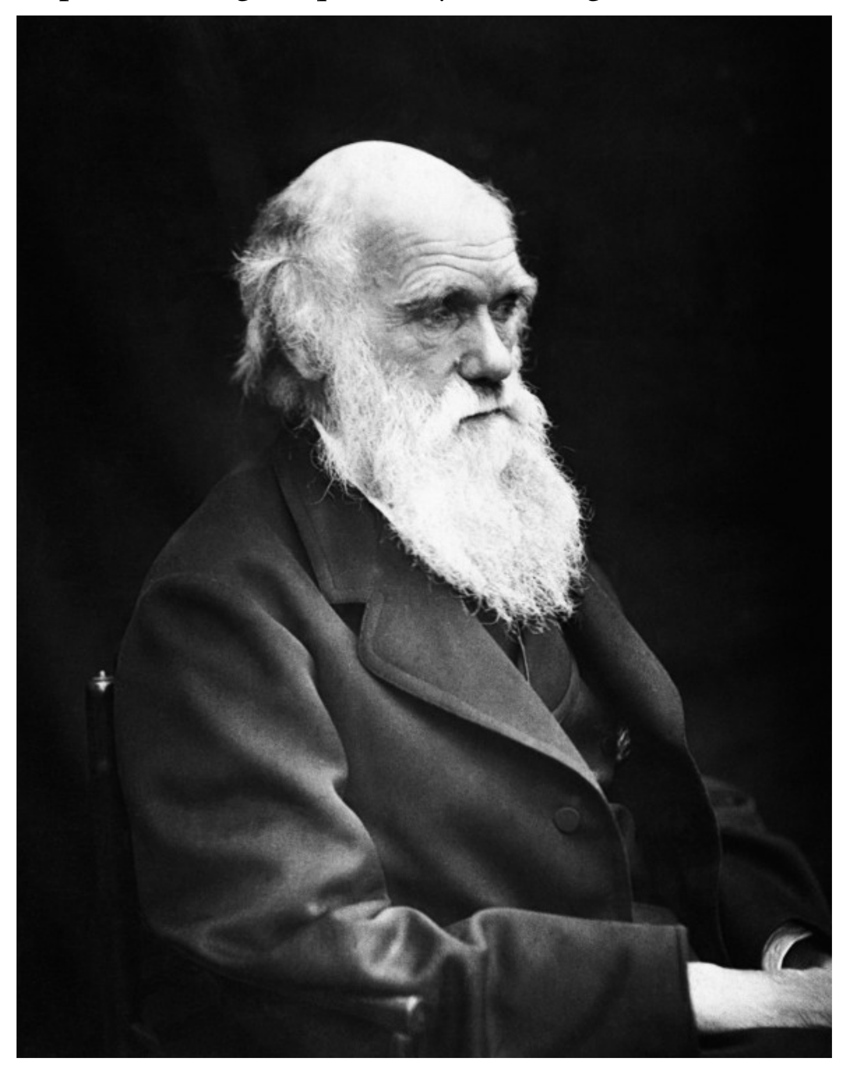


Figura 1. Charles Darwin, por Leonard Darwin (1878).

En el todavía vigente párrafo de introducción de *El origen de las especies*, Charles Darwin plantea (1859, pág. 3) que los temas clásicos de la historia natural proporcionan pruebas suficientes de la existencia de la evolución:

> Al considerar el origen de las especies, es totalmente comprensible que un naturalista, reflexionando sobre las afinidades mutuas de los seres orgánicos, sobre sus relaciones embriológicas, su distribución geográfica, su sucesión geológica y otros hechos semejantes, llegue a la conclusión de que las especies no han sido creadas independientemente, sino que han descendido, como variedades, de otras especies.

Luego añade, en una frase portentosa de gran trascendencia para la historia posterior de la teoría evolutiva, que tal explicación puede parecer vacua, no sólo porque excluye un sujeto central, sino también por motivos estéticos:

> No obstante, semejante conclusión, aun cuando estuviese bien fundada, no sería satisfactoria hasta que pudiese demostrarse de qué modo las innumerables especies que pueblan este mundo se han modificado hasta adquirir esa perfección de estructura y coadaptación que causa, con justicia, nuestra admiración.

A continuación, Darwin cita las razones que le movieron a buscar las causas del cambio evolutivo (y no las meras manifestaciones de este cambio, que pueden determinarse de otros modos): la *complejidad* y la *precisión* de los buenos diseños orgánicos (y no sólo la mera existencia de los mismos). Darwin insta a considerar las alternativas: ¿de qué manera, si no es por la selección natural, podrían surgir adaptaciones precisas atribuibles a causas materiales, sin recurrir a una construcción sobrenatural? Darwin menciona que la mayoría de los naturalistas citaría la inducción ambiental de variaciones, pero esta explicación no puede dar cuenta de la belleza y complejidad de las adaptaciones (un argumento con un fuerte componente estético):

> Los naturalistas se refieren continuamente a las condiciones externas, tales como el clima, el alimento, etc., como la única causa posible de variación. En un sentido limitado, como veremos después, esto puede ser verdad; pero es absurdo atribuir a factores meramente externos la estructura, por ejemplo, del

pájaro carpintero, con sus patas, su cola, su pico y su lengua tan admirablemente adaptados para capturar insectos bajo la corteza de los árboles.

Si se añade la noción lamarckiana del uso y el desuso (que Darwin etiqueta como «hábito») o una voluntad orgánica explícita (una malinterpretación usual del pensamiento de Lamarck, que Darwin conoció por el resumen escrito por Charles Lyell en el segundo volumen de *Principies of Geology*, publicado en 1832), se obtiene una explicación aproximada para la precisión, pero no para la intrincada coadaptación de organismos ecológicamente independientes. Darwin continúa (1859, pág. 3):

> En el caso del muérdago, que obtiene su alimento de ciertos árboles, cuyas semillas deben ser transportadas por ciertas aves y cuyas flores de sexos diferentes requieren la mediación de ciertos insectos para llevar el polen de una flor a otra, es igualmente absurdo explicar la estructura de este parásito y sus relaciones con diversos seres orgánicos distintos por los efectos de las condiciones externas, de la costumbre o de la volición de la planta misma.
>
> (*Ibíd.*)

Sólo queda una alternativa a la selección natural: el concepto ortogenético de una secuencia de transformaciones filogenéticas «programada de antemano», como la que propuso el autor y editor escocés Robert Chambers en *Vestiges of the Natural History of Creation*, publicada anónimamente en 1844. Darwin rechaza acertadamente esta idea mediante el argumento metodológico de que, al igual que la idea de la creación por voluntad divina, es completamente incontrastable:

> Imagino que el autor de *Vestiges of Creation* diría que, después de un número indeterminado de generaciones, algún pájaro habría generado el pájaro carpintero, alguna planta el muérdago, y que habrían sido producidos tan perfectos como los conocemos; pero esta presuposición no me parece una explicación, porque ni toca ni esclarece la causa de las adaptaciones mutuas de los seres orgánicos y su adecuación a sus condiciones físicas de vida.
>
> (Darwin, 1859, pág. 4)

Los evolucionistas anglófonos están tan acostumbrados a aceptar la prioridad de la adaptación que suelen considerarla evidente por sí misma y no sujeta a una construcción alternativa.

Pero decidir que la adaptación es el fenómeno básico que debe explicar la evolución es una estrategia particularmente inglesa y de ningún modo un enfoque universal. La revolución de Darwin se caracteriza por proponer una explicación de la adaptación radicalmente nueva, que da la vuelta a las teorías anteriores, pero no por otorgarle un papel central (a fin de cuentas, el diseño óptimo había sido el tema principal de la historia natural inglesa desde hacía 200 años, por lo menos).

Estas diferencias nacionales, muy anteriores a la aceptación de la visión evolutiva, se originaron en las diferentes maneras de abordar la cuestión de cómo los mecanismos de la naturaleza reflejan la existencia y los atributos de un creador divino. La corriente típicamente inglesa de la «teología natural» afirmaba que la existencia de Dios, así como sus atributos de benevolencia y omnisciencia, podían inferirse de la perfección de la construcción de los organismos, especialmente de su diseño[2] óptimo y de la armonía de los ecosistemas. La teología natural fue defendida por algunos de los principales científicos del siglo XVII, en particular por Robert Boyle y John Ray. Alcanzó su cénit con la publicación de *Natural Theology* de William Paley, un libro enormemente influyente cuya primera edición data de 1802, y disfrutó de un florecimiento tardío, tal vez un poco desfasado, en la serie de tratados Bridgewater de la década de 1830. Los teólogos naturales consideraban que la «adaptación» (en su propia acepción, no en el sentido evolutivo de Darwin) era el fenómeno más importante de la biología, pues revelaba la existencia y la naturaleza de Dios.

Esta actitud era ajena a la mayor parte de los biólogos continentales, quienes, sin negar la adaptación, tendían a contemplar el diseño óptimo como un conjunto de divagaciones superficiales y parciales superpuestas a las evidencias básicas de la inteli-

gencia divina: las estructuras subyacentes y sus pautas de transformación en el orden taxonómico de los animales. La mayor parte de los estructuralistas continentales consideraba que la adecuación del pie palmeado del pato o el antebrazo cavador del topo era demasiado singular y enfermiza para ilustrar algo tan universal y sublime como la omnisciencia de Dios. Louis Agassiz, gran zoólogo suizo (y más tarde estadounidense) contemporáneo de Darwin, considerado el último científico creacionista importante, sostenía que la estructura taxonómica del reino animal revelaba mucho mejor la naturaleza e intencionalidad de Dios. Según Agassiz, cada especie era la encamación de un pensamiento divino y, por tanto, las relaciones entre las especies mostraban la estructura mental de Dios.

No pretendo establecer esta diferencia como una dicotomía clara e invariable. Algunos científicos continentales, entre quienes destaca el naturalista francés Georges Cuvier, mantuvieron un enfoque básicamente adaptacionista (no evolucionista, por supuesto) y algunos ingleses optaron por buscar reglas geométricas de transformación arquetípica en lugar de la mera adecuación de adaptaciones particulares a entornos concretos. Entre ellos se encontraba Richard Owen, cuya adhesión a esta forma atípica de evolucionismo le reportó frecuentes malinterpretaciones (sobre todo por parte de la floreciente comunidad darwinista, que se complacía en desacreditar a sus principales enemigos) y una fama de creacionista tenaz (el evolucionismo no adaptacionista se confundía fácilmente con un rechazo de la evolución en general, en vez de una simple oposición a la centralidad de la adaptación, fenómeno privilegiado por Darwin). La teología natural de Paley era el coto de los académicos de Cambridge y no el de los médicos de Edimburgo y Londres (quienes, como ha mostrado excelentemente el biógrafo e historiador de la ciencia Adrian Desmond, a menudo abrazaban las doctrinas lamarckianas y estruc-

turalistas); pero Darwin pertenecía a Cambridge, y esta genealogía intelectual prevaleció finalmente en la biología británica.

Así pues, puede ser útil examinar la continuidad específicamente británica que va del adaptacionismo y los teólogos naturales a su metamorfosis en la «descendencia con modificación» de Darwin. Se acostumbra a resaltar el contraste entre Paley y Darwin (con buen criterio, pues la naturaleza de la revolución darwiniana se caracteriza por la inversión causal de las ideas de Paley) pero pocos se han detenido en esta continuidad igualmente llamativa. En pocas palabras, Darwin mantuvo la fenomenología e invirtió la explicación, por lo que debemos conocer qué retuvo y qué rechazó.

La teología natural suele definirse a partir de su expresión canónica y tardía en la obra de Paley (o por sus agónicos coletazos en los últimos tratados Bridgewater). No obstante, me gustaría centrarme en los escritos fundadores y, en particular, en los trabajos de Boyle (ver figura 2), el más importante de los contemporáneos de Newton. Boyle trató el tema de forma extensa y explícita en un libro publicado en 1688 y titulado *A Disquisition About the Final Causes of Natural Things, Wherein it is Inquir'd Whether, and (If at All) With What Causations, a Naturalist Should Admit Them* [Disquisición sobre las causas finales de los cuerpos naturales, en la que se pregunta si, y con qué precauciones (si es que hay que tomar alguna), un naturalista debería admitirlas]. Quiero examinar la forma en que Boyle establece que la adaptación orgánica es la principal indicación natural de la existencia y atributos de Dios. A continuación, hablaré de las características de este sistema que tuvieron más continuidad en la posterior tradición darwiniana y también los elementos que el evolucionismo rechazó con más contundencia. Creo que, al describir esta continuidad ininterrumpida, podrán entenderse mejor las diferencias.

Al igual que los linajes naturales que Darwin estudió, su teoría mantiene una continuidad genealógica con sus antepasados intelectuales locales. Los aspectos realmente revolucionarios de la selección natural se entienden mejor si se la considera como una inversión explicativa dentro de un marco inalterado, en el que la adaptación es el fenómeno básico que debe explicar cualquier teoría aceptable de la historia de la vida.

La formulación de Boyle

Los artífices de la revolución científica (es decir, la formulación de la ciencia moderna de finales del siglo XVII que los historiadores suelen enaltecer, a menudo con mayúsculas, como *la* Revolución Científica) mantuvieron una actitud peculiar respecto al papel de Dios en la naturaleza. Todos ellos eran teístas piadosos, y Robert Boyle más que nadie (al menos de una manera convencional, ya que Newton era el más ferviente devoto). Ninguno negaba a Dios su prerrogativa tradicional de intervenir milagrosamente en los asuntos de la naturaleza, en cualquier momento que él quisiera o creyera necesario. Boyle, por ejemplo, escribe en su *Disquisition* (1688, pág. 96):

> Esta doctrina tampoco es inconsistente con la creencia en los verdaderos milagros; pues supone que el curso ordinario y establecido de la naturaleza se mantiene, sin negar en absoluto que el más libre y poderoso Autor de la naturaleza sea capaz, siempre que lo considere oportuno, de suspender, alterar o contradecir dichas leyes del movimiento, que él solo estableció en el principio, y que necesitan de su participación continua para mantenerse.

Pero se consideraba que, a todos los efectos, Dios nunca actúa de esa manera. Una deidad que tuviera que intervenir perpetuamente en los asuntos de la naturaleza para corregir pequeños errores técnicos, cuya omnisciencia debería haber previsto, es también un poder torpe y pobre. Es mucho más majestuoso

creer en un Dios infalible que dicta todas las leyes en el origen del universo para que produzcan los efectos deseados en el devenir posterior, sin necesidad de mantenimiento activo. Esta «doctrina» (en palabras de Boyle) de un Dios «relojero», que instituye las leyes en el origen y luego deja que la naturaleza funcione según los principios invariantes que ha ordenado, estableció una espléndida armonía entre teología y ciencia. Dios, como mecánico perfecto, combina una grandeza máxima con una perturbación mínima. En pocas palabras, el Autor de la naturaleza había construido un mundo que la ciencia podía comprender en su totalidad.

Sin embargo, esta actitud operacional encierra una paradoja. Si «el cielo declara la gloria de Dios y el firmamento muestra su obra» (recordemos la cita de estas palabras en el oratorio *La Creación*, 1798, de Haydn para percibir su poder emotivo), ¿cómo podemos conocer esta verdad, la más fundamental de todas? Si la naturaleza opera mediante leyes invariantes, ¿dónde está la huella de Dios en las obras de su creación? Él ordenó sin duda la ley de la inversa del cuadrado, pero estas abstracciones matemáticas parecen un tanto distantes de nuestra necesidad de afirmar su benevolencia y su amor por la humanidad, la cumbre de su creación. ¿Cómo llegaremos a tomar conciencia de nuestra posición privilegiada? ¿Cómo podemos estar seguros de que «después de que los gusanos destruyan este cuerpo, aún en mi carne veré a Dios»? (recordemos ahora el inicio del *Mesías* de Handel, 1741).



Figura 2. Robert Boyle.

La solución más satisfactoria a esta paradoja se basa en la antigua doctrina aristotélica de la causa final. (Recordemos que Aristóteles, en su *Organon*, dividió la causalidad en cuatro modalidades distintas, que denominó material, eficiente, formal y final. Utilizando la clásica «parábola de la casa», el recurso pedagógico usual para aclarar esta idea, las causas materiales serían el material de construcción (paja, madera o ladrillos, que ofrecen distintos grados de protección contra los lobos); las causas eficientes

serían los agentes reales del efecto (los albañiles que colocan los ladrillos); las causas formales serían los planos o arquetipos abstractos que guían la construcción (los proyectos no hacen nada directamente, pero no se puede avanzar más allá de un montón de ladrillos sin un plan); las causas finales serían los propósitos: la casa no se construirá a menos que alguien quiera vivir en ella y pueda encomendar a alguien su construcción.)

La revolución científica otorgó tal prioridad a las causas eficientes que los usos modernos han restringido el concepto entero de causa a tan solo una de las cuatro modalidades aristotélicas. Aún reconocemos la importancia de los factores material y formal, pero ya no nos referimos a ellos como causas. Las causas finales no se conciben para los objetos inorgánicos (la luna no existe para iluminar el cielo nocturno) y, en la evolución de los organismos, se aceptan como una consecuencia no intencional de la selección natural (los topos tienen antebrazos fuertes para excavar, pero no se esforzaron conscientemente para desarrollarlos). El cerebro humano nos concede intencionalidad y causa final en el sentido original del término, pero esto no es común en la naturaleza.

No obstante, la causa final era todavía una noción legítima para los científicos de la generación de Boyle (a pesar de la famosa desaprobación de Francis Bacon). Para Boyle, la causa final podía funcionar de forma paralela a los eficientes artefactos de su universo mecánico. Las causas eficientes empujaban todos los muelles y hacían girar todas las poleas, pero las causas finales expresaban los propósitos que Dios tenía en mente en el momento de la creación. Dios no tenía por qué intervenir milagrosamente en el reino de las causas eficientes; el Dios de Boyle se manifestaba en las causas finales de fenómenos construidos mediante eficientes ordinarias, bajo las leyes invariantes de la naturaleza.

¿Qué fenómenos naturales son los más adecuados para descubrir y elucidar las causas finales? La lógica del argumento de Boyle nos lleva precisamente hasta los organismos y su diseño óptimo; es decir, a la adaptación como el fenómeno natural quintaesencial, que muestra la existencia de Dios y sus atributos. Boyle empieza su *Disquisition* citando a los dos principales opositores filosóficos de la causa final: la creencia epicúrea de que un universo aleatorio no puede manifestar propósito y la afirmación cartesiana de que los fines de Dios son ininteligibles para la mente humana:

> Dos de las principales sectas filosóficas modernas, aunque partiendo de bases distintas, niegan que el naturalista tenga que preocuparse u ocuparse en modo alguno de las causas finales. Epicuro y la mayoría de sus seguidores… proscriben la consideración de los fines de las cosas porque al estar el mundo, según ellos, hecho por azar, no cabe suponer que obedezca a propósito alguno. Por el contrario, monsieur Descartes y la mayoría de sus seguidores suponen que todos los fines de Dios en las cosas corpóreas son tan sublimes que fuera presunción en el hombre pensar que su razón pueda llegar a descubrirlas. Así que, según estas sectas opuestas, o bien no es pertinente buscar las causas finales o bien es presuntuoso pensar que podemos descubrirlas.
>
> (*Ibíd.*, prefacio)

Boyle aplica el método «Ricitos de Oro» e intenta encontrar el fenómeno apropiado entre dos extremos. Propone tres categorías de objetos naturales que podrían manifestar causas finales: los cuerpos inanimados del cosmos, los cuerpos inanimados terrestres y los cuerpos orgánicos.

En la categoría de objetos «demasiado grandes», que no esclarecen la cuestión de la causa final, Boyle coloca los enormes cuerpos celestes del universo. Los soles y planetas deben manifestar un propósito divino, pero en esto Descartes debe estar en lo cierto, ya que nosotros, minúsculos habitantes de un pequeño planeta, no podemos entender los propósitos divinos a tan gran escala. No hay duda de que los cuerpos del cosmos ensalzan la grandeza de Dios, pero no su benevolencia y amor por la huma-

nidad. «La manera cartesiana de considerar al mundo es ciertamente adecuada para mostrar la grandeza del poder de Dios, pero no para poner de manifiesto su sabiduría y su caridad, como la manera por la que yo abogo» (*Ibíd.*, pág. 37)

En la categoría de fenómenos «demasiado pequeños», indignos de la gloria divina, Boyle coloca los fenómenos inorgánicos terrestres, tan simples que bien pudieran formarse por azar, como decían los epicúreos, o por ensamblaje sencillo conforme a las leyes invariantes de la naturaleza (Dios ordenó las leyes, desde luego, pero las causas finales tienen que exhibir su esplendor directamente y no por omisión):

> En cuanto a otros cuerpos inanimados, como piedras, metales, etc., cuya materia no parece estar organizada, no sería absurdo pensar que también fueron construidos con propósitos distintos y particulares… pero en su mayoría son de contexturas tan sencillas y poco elaboradas que no parece absurdo pensar que la variedad de eventos y forcejeos de las partes de la materia universal pueda haberlos producido en un momento u otro.
>
> (*Ibíd.*, pág. 44)

A continuación, Boyle propone a animales y plantas como la categoría perfecta para evidenciar las causas finales que ilustran la existencia y los atributos de Dios; es decir, los convierte en los objetos favoritos de la teología natural.

Boyle cita tres razones fundamentales para esta preferencia. En primer lugar, los organismos son tan complejos que sus formas y comportamientos no pueden atribuirse al azar o a una construcción simple derivable de leyes naturales sin un propósito particular evidente:

> Existen algunos efectos tan sencillos y tan inmediatos de producir que no puede inferirse de ellos ningún conocimiento o intención en sus causas; pero existen otros que requieren tal número y concurso de causas conspirantes, y tal serie continuada de movimientos y operaciones, que es absolutamente improbable que se produzcan sin la supervisión de un agente racional, sabio y poderoso… Nunca vi ninguna producción inanimada de la naturaleza o, como dicen, del azar cuya ingeniería sea comparable a la del miembro más humilde del más despreciable de los animales; y se expresa incomparablemente

> más arte en la estructura de la pata de un perro que en el famoso reloj de Estrasburgo.
>
> (*Ibíd.*, págs. 45-47)

En segundo lugar, los organismos tienen nuestro tamaño y actúan de forma parecida a la nuestra, de modo que podemos comprender fácilmente las causas finales de su diseño (no puede decirse lo mismo de cuerpos inmensos, ardientes y alejados de la Tierra como los soles). Boyle centra su atención en el ejemplo típico de adaptación: el diseño y función del ojo:

> El gran autor de las cosas… ha dotado a diversas especies animales de órganos de visión formados y colocados de formas muy diferentes… Esta diversidad manifiesta noblemente su gran providencia y (si puedo llamarlo así) previsión, la cual ha ajustado admirablemente los ojos de los distintos tipos de animales tanto al resto de sus cuerpos como… a aquellas partes del gran teatro del mundo en las cuales ha dispuesto que vivan y actúen.
>
> (*Ibíd.*, págs. 58-59)

En tercer lugar, y esto también queda reflejado en la cita anterior, los seres humanos podemos comprender fácilmente la *utilidad* de la formas y funciones orgánicas; el atributo que manifiesta más claramente las causas finales es la función, o adaptación. Boyle sigue la estrategia, típica desde entonces entre los adaptacionistas de tendencia tanto creacionista como evolucionista, de tratar las aparentes excepciones (aquellas características que parecen degeneradas o sin función) y luego mostrar que también son adecuadas para el tipo de vida del animal. Así, Boyle dice sobre los ojos rudimentarios de los topos:

> Los ojos que la naturaleza les ha proporcionado son tan pequeños en proporción a sus cuerpos que se cree comúnmente, y lo mantienen incluso algunos hombres eruditos, que carecen de órganos visuales. Pero los estudios anatómicos realizados por mí mismo y otros demuestran lo contrario, si bien sus ojos difieren mucho de los de otros cuadrúpedos. Esto no debe extrañar, ya que la naturaleza determinó que los topos tenían que vivir bajo tierra, donde la vista es innecesaria e inútil, y donde unos ojos grandes estarían más expuestos al peligro. Su vista, tan escasa como es, les basta para percibir si están o no bajo tierra… lo cual parece que es el uso más necesario que hacen de la luz y de los ojos.

(*Ibíd.*, pág. 60)

Sustituyamos la previsión de Dios por la selección natural y este argumento sobre la función se parecerá asombrosamente al que formularía un adaptacionista darwiniano.

Continuidad de la adaptación entre la teología natural de Boyle y el darwinismo

Aunque hay muchas excepciones, se puede afirmar que los organismos tienden a estar bien diseñados. Así, a pesar de que Darwin invirtió la explicación de Boyle, la fenomenología siguió siendo la misma. La fuerza del programa adaptacionista se ha mantenido inalterada desde Boyle hasta el darwinismo moderno, como puede observarse claramente en la estrategia sumamente operacional y fructífera de conjeturar una utilidad «para» cierta función cuando intentamos analizar una estructura enigmática. El brillante párrafo de Boyle acerca de cómo William Harvey utilizó la estructura de las válvulas venosas para inferir la circulación de la sangre ilustra perfectamente la famosa agudeza de Louis Pasteur de que «la fortuna favorece a la mente preparada» y muestra que las suposiciones de diseño divino pueden funcionar de manera admirable. Sustitúyase «selección natural» por «una causa tan providencial» y la heurística del adaptacionismo moderno resonará en este pasaje. Los defensores modernos del adaptacionismo (véase, por ejemplo, el artículo de Ernst Mayr para *American Naturalist*, 1983) ubican una prioridad racional en el mismo argumento utilitarista:

> Recuerdo que cuando pregunté a nuestro famoso Harvey, en la única conversación que mantuve con él (un poco antes de su muerte), qué le había inducido a pensar en la circulación de la sangre, me respondió que fue la percepción de que las válvulas de las venas de tantas partes del cuerpo estaban colocadas de forma que dejaban pasar la sangre que iba al corazón, pero cerraban el paso a la sangre venosa en sentido contrario. Imaginó que una causa tan provi-

> dencial como la naturaleza no habría colocado tantas válvulas sin un propósito, y que ningún propósito parecía más probable que éste: puesto que la sangre no podía enviarse bien de las venas a las extremidades, debido a las válvulas que se interponían, tendría que enviarse a través de las arterias y volver a través de las venas, cuyas válvulas no se oponían a su curso en tal sentido.
>
> (*Disquisition*, págs. 157-158)

Aunque el método parece funcionar muy bien en estos casos, aparecen debilidades y defectos notables (tanto para Boyle en 1688 como para los adaptacionistas actuales) cuando la presunción de función óptima se convierte en un dogma *a priori* y en una afirmación esencialmente irrefutable. Las dos críticas más frecuentes contra la aplicación acrítica y abusiva de los actuales argumentos adaptacionistas pueden aplicarse a muchos de los ejemplos de Boyle, con lo que se establece una continuidad dentro de una de las mayores divisiones intelectuales, de la biología creacionista a la evolutiva.

«Cuentos de así fue», cuyo criterio principal no es tanto el soporte empírico como la habilidad dialéctica

El argumento funcional de Harvey triunfó porque obtuvo pruebas confirmatorias; su hipótesis era acertada y pudo utilizarla para dirigir la investigación. Los argumentos adaptacionistas son un caso distinto y opuesto: utilizan tácticas que obstaculizan la investigación en vez de motivar el análisis. Proponen con demasiada frecuencia meras explicaciones ingeniosas y luego juzgan que han cumplido su tarea por la habilidad del argumento, y no mediante la confirmación empírica de sus afirmaciones. Muchos críticos llaman a estas propuestas «cuentos de así fue», en referencia a las explicaciones deliberadamente extravagantes de Rudyard Kipling acerca de cómo los elefantes obtuvieron sus largas trompas y los rinocerontes su piel arrugada.

A continuación comentaré varias afirmaciones de esta clase tomadas de la obra de Boyle, desde explicaciones potencialmente válidas hasta otras completamente falsas. Todas ellas se engloban en la categoría de los enigmas adaptativos: estructuras aparentemente mal diseñadas o carentes de función, pero que requieren una explicación adaptativa si el paradigma tiene la validez universal que suponen sus partidarios:

1) Acerca de la inutilidad temporal: De cómo puede construirse un argumento funcional para las estructuras embrionarias que sólo aparecen temporalmente y no parecen tener ninguna función intrauterina conocida. Boyle construye el inteligente argumento, probablemente correcto en este caso, de que dichas características son requisitos estructurales (él los llama «andamios») para los órganos funcionales que les sucederán:

> Estas partes temporales fueron armadas por un agente tan creador como previsor, que dispuso que deberían servir para tal función y luego dejarse de lado; sería totalmente improbable que un agente sin voluntad armara unos andamios tan oportunos y excelentes para las construcciones futuras si no hubiera previsto de antemano que ambos concurrieran en un mismo resultado.
>
> (*Ibíd.*, pág. 167)

Aquí debe observarse que, para Boyle y sus contemporáneos, la constatación de cualquier valor adaptativo en algún estado futuro (en este caso, el andamiaje de una construcción posterior) parecía un argumento lo bastante potente a favor de un creador consciente; de no ser así, ¿cómo podía surgir una estructura útil con posterioridad? Nuestra época ha encontrado una solución diferente mediante el concepto de las instrucciones programadas y su evolución. Pero la generación de Boyle ni siquiera poseía una metáfora para esta noción, fuera de juguetes como la caja de música. La introducción de los patrones de Jacquard en los telares del siglo XVIII y de la tecnología informática en nuestro tiempo han convertido la programación en un concepto habitual de la vida moderna. Todos podemos entender cómo funciona el

ADN y ningún científico afirmaría en la actualidad que la construcción orgánica para una utilidad ontogénica futura implica un propósito consciente.

2) Acerca de la redundancia aparente: Pasamos ahora a un ejemplo menos plausible, aunque no ridículo, que se ofrece en forma de especulación. En este caso, Boyle ignora completamente las obvias alternativas estructuralistas y da una explicación puramente funcional de la simetría bilateral, la protección contra las pérdidas:

> Parece que se ha tomado cierto cuidado en que el cuerpo de un animal esté dotado no sólo de todas las cosas que son necesarias y convenientes, sino también de alguna sobreabundancia de ellas por si se producen pérdidas. En consecuencia, un hombre puede vivir bien y propagar su linaje (como muchos hacen) aunque haya quedado tuerto, debido a que la naturaleza suele dotar a los hombres con dos ojos; puesto que si uno enferma o se pierde, el otro basta para ver… En resumen, la naturaleza ha dotado a los hombres con doble provisión de cada cosa en donde tal duplicidad puede ser útil.
>
> (*Ibíd.*, pág. 143)

3) Acerca de un perjuicio aparentemente indiscutible: Boyle escribe, revelando un prejuicio cultural todavía vigente acerca de la valoración del género femenino, que la debilidad anatómica de la mujer no puede ser «óptima» para su vida individual, pero que beneficia a la especie porque favorece la procreación:

> Las mujeres no están constituidas tan felizmente como los hombres para su propio bienestar, debido a que el útero y otras cosas peculiares de las mujeres, que no son necesarias para el bien de las personas sino para la propagación de su especie, someten a este sexo débil a un gran conjunto de enfermedades que las afectan por su condición de mujeres o por su contacto con niños o por el parto, y de las cuales se libran los hombres… Los hombres *[es decir, la gente]* se equivocan a veces cuando afirman perentoriamente que esta o aquella parte de un animal puede o no puede haber sido creada para cierto uso, sin considerar los posibles designios cósmicos, y por lo tanto primarios y decisivos, de la naturaleza para la construcción del animal completo.
>
> (*Ibíd.*, pág. 220)

4) Suposiciones que han resultado del todo equivocadas: Esta estrategia general fracasa totalmente cuando descubrimientos posterio-

res reducen sus propuestas a simples conjeturas fatuas. La última cita proporciona un ejemplo de ello, ya que ahora sabemos que la mujer supera al hombre en esperanza de vida. De esta manera, el conocimiento «seguro» acerca de la intención divina de Boyle sufre una inversión. Otro ejemplo, que expone de forma todavía más explícita las debilidades del método, aunque sin duda tiene un impacto social mucho menor, es que al parecer Boyle pensaba, equivocadamente, que los dientes humanos crecían durante toda la vida. Así, proponía una utilidad divina para este fenómeno inexistente:

> Es digno de considerar que, cuando un hombre finaliza su crecimiento, todos los huesos de su cuerpo dejan de crecer excepto los dientes, que siguen alargándose durante toda su vida… Esta diferencia entre el crecimiento de los dientes y el de los demás huesos, qué razón puede tener sino que esté destinada a reparar el desgaste diario de la sustancia dental, producida por la frecuente fricción que se produce entre la hilera inferior y la superior durante la masticación.
>
> (*Ibíd.*, pág. 182)

Cambio de paradigma tras falsación

La utilización de los argumentos adaptacionistas como primeras aproximaciones no sería tan criticable si la falsación de una afirmación particular permitiera poner a prueba explicaciones alternativas fuera del programa adaptacionista. Pero los funcionalistas acérrimos no trabajan de forma tan abierta: la refutación de una hipótesis adaptativa tan solo produce una desviación hacia una historia diferente que, invariablemente, se mantiene dentro del esquema funcional. En consecuencia, el paradigma no puede refutarse desde dentro.

Ya vimos un ejemplo de esta estrategia «irrebatible» cuando Boyle, desconcertado por la aparente debilidad corporal de la mujer y ante la dificultad de idear un argumento funcional basa-

do en ventajas para las mujeres individuales, cambiaba de nivel dentro del paradigma y argumentaba que cualquier desventaja para la mujer como individuo tenía que estar compensada por la ventaja para la especie.

Boyle vuelve a utilizar esta estrategia a lo largo de su exposición. Por ejemplo, tras alabar la ubicuidad de los buenos diseños biomecánicos, Boyle vacila cuando no puede encontrar una explicación funcional para los vivos colores de algunos animales (irónicamente, la mayoría de estos casos se explica ahora mediante la idea de la selección sexual). Pero no abandona la explicación funcional; tan sólo cambia de nivel, argumentando que la utilidad de los colores debe ser estética en vez de biomecánica:

> Para entender esto es conveniente considerar que, como Dios es el agente más libre y más sabio, no es extraño que adorne a algunos animales con partes o cualidades que no son necesarias para su bienestar, sino que parecen diseñadas para su belleza, como lo son la predisposición del camaleón a cambiar de color y los preciosos verdes, azules, amarillos y otros vivos colores que adornan a algunas palomas y papagayos… y especialmente aquellas admirables pequeñas criaturas aladas llamadas colibríes.
>
> (*Ibíd.*, pág. 205)

Extendiendo esta explicación al caso aún más problemático de la asombrosa diversidad de diseños de un mismo órgano (por qué existen tantas clases de ojo si la estructura básica funciona tan bien y la mayoría de estas variantes no tiene una relación obvia con los modos de vida de sus propietarios), Boyle saca a relucir la peculiar propuesta (por primera vez, detecto cierto recato de su parte) de que Dios se vale de esta variedad para instruimos sobre el alcance de su sabiduría (este argumento es el más forzado de todos, porque la ordenación de la diversidad sin relación con formas de vida particulares proporciona la fenomenología más potente para el enfoque estructuralista basado en «leyes de forma» y regularidades de transformación):

> Si se admite… como muy probable que Dios quisiera, mediante la gran diversidad de sus obras, mostrar a sus observadores inteligentes la fecundidad (si

puedo decirlo así) de su sabiduría, se podría concebir fácilmente que gran parte de la diversidad que se observa en las partes análogas de los animales (ojos, bocas, etc.) pudiera obedecer a un motivo tan profundo; a este designio podría subordinarse la belleza de algunas criaturas y de sus partes, así como su estructura más necesaria y conveniente, en especial si lo que se busca es el gozo sencillo del hombre, como suele suceder en las formas de las diversas flores, en la música melodiosa de las aves canoras y en los colores vivos y variados de las plumas de varios animales alados, como las que forman la cola del pavo real.

(*Ibíd.*, págs. 208-9)

Rematamos esta sección con la afirmación más explícita de Boyle sobre el adaptacionismo como metodología. En ella defiende las dos estrategias criticadas antes (la dependencia de conjeturas tipo «cuentos de así fue» y la refutación de particulares mediante cambios exclusivamente dentro del paradigma) declarando que nosotros, pobres mortales, no podemos comprender el alcance completo de la intención divina y que nuestros errores al determinar las funciones radican más seguramente en nuestra ignorancia que en la necesidad de una explicación alternativa:

Los hombres pueden precipitarse fácilmente si piensan que, al encontrar una parte construida imperfectamente, el análisis anatómico de la misma les revelará todos los usos que la habilidad del artífice divino diseñó para ella.

(*Ibíd.*, pág. 203)

Podemos concluir con certeza que Dios actúa sabiamente cuando hace algo que tiende admirablemente a aquellos designios que nosotros, correctamente, suponemos; pero no podemos concluir negativamente que esto o aquello no sea sabio porque no podemos discernir en ello tal tendencia. Pues un ser tan sabio puede tener otros motivos que nosotros no conocemos y otros objetivos que no podemos discernir o ni siquiera sospechar… [objetivos que están] más allá del alcance de nuestras conjeturas y sin cuyo conocimiento no podemos objetar precipitadamente la sabiduría de sus actos.

(*Ibíd.*, págs. 209-210)

Un argumento ciertamente irrebatible pero, por eso mismo, ¡no demasiado útil para la ciencia! (por lo menos desde el punto de vista actual).

La diferencia radical entre el adaptacionismo evolucionista (es decir, el darwiniano) y el creacionista

Darwin solía decir que había intentado introducir dos innovaciones diferentes con su teoría de la «descendencia con modificación». En primer lugar, quería demostrar la realidad de la evolución (que afirma la base genealógica de las relaciones orgánicas y explica la historia de la vida como una serie de transmutaciones). En segundo lugar, quería proponer una teoría (la selección natural) que explicara las causas de esta realidad. Más tarde comentó que el primero de estos objetivos (la demostración de los hechos evolutivos, antes que el mecanismo) era más importante, porque su admisión tenía consecuencias revolucionarias respecto de la tradición del pensamiento occidental. Podemos utilizar esta famosa y perspicaz autoafirmación para identificar qué fue lo que cambió de forma tan contundente en el marco adaptacionista de los naturalistas anglófonos.

Comenzando con la segunda motivación de la teoría, muchos historiadores han dicho que la característica más revolucionaria del mecanismo darwiniano es su inversión radical de la teología natural. Para Boyle, el diseño adaptativo representa la obra directa de un Dios bondadoso. Para Darwin, este mismo fenómeno surge como efecto colateral de un principio causal que sólo puede transmitir un mensaje moral opuesto (si la moralidad pudiera derivarse de la naturaleza, cosa que, según Darwin, no puede hacerse en modo alguno): la lucha entre organismos por el éxito reproductivo individual.

Esta inversión crucial marca una diferencia entre los argumentos adaptacionistas de Boyle y los de los darwinianos posteriores; Boyle encuentra adaptaciones en todos los niveles de la organización biológica (ya que en todos ellos se puede apreciar la intención de Dios), mientras que Darwin atribuye ventajas en

relación a la competencia reproductiva de los organismos, y niega conceptos tan «cómodos» como el «bien de la especie». Tal como vimos en el argumento sobre la supuesta debilidad femenina, Boyle recurre despreocupadamente a las ventajas adaptativas para la especie entera cuando no puede identificar ventajas para los individuos. En un ejemplo más elocuente, Boyle reconoce que la placenta tiene un diseño excelente, pero sólo puede atribuir su estructura a la benevolencia divina hacia nuestra especie, porque la salud y la fuerza de las mujeres no mejoran con ello (como era de esperar, la noción darwiniana básica del éxito *reproductivo* individual como un *summum bonum* orgánico está ausente de la imagen boyleana de la naturaleza):

> Estas partes temporales parecen diseñadas por la naturaleza no tanto para la preservación personal de la mujer como para la propagación de la especie; su objeto… parece haber sido predeterminado por el Autor de la humanidad para su continuación [de la especie].
>
> (*Ibíd*., pág. 152)

Aunque la diferencia impuesta por la teoría parece llamativa, los cambios más importantes tienen que ver (como advirtió correctamente Darwin) con la aceptación de la factualidad básica de la evolución. Al fin y al cabo, Darwin insistió (a pesar de lo mucho que se ha dicho en el marco del pensamiento evolutivo del siglo XX) en que los argumentos basados en la selección natural sólo podían aplicarse a la lucha entre individuos. Esta posición de Darwin era bastante personal y tan tajante que la mayoría de sus contemporáneos, incluso sus defensores más acérrimos, nunca entendieron la importancia de esta restricción de niveles. Así, Alfred R. Wallace, colega de Darwin y codefensor de la teoría de la selección natural, extendía de buena gana los argumentos seleccionistas a todos los niveles e incluía frecuentes alegatos al «bien de la especie». Los argumentos evolutivos de Wallace no diferían en este aspecto del argumento del diseño de Boyle.

No obstante, el reconocimiento de que los organismos tienen historias de conexión genealógica impone una visión tan diferente de la estructura de la vida que todos los argumentos de la historia natural deben alterarse. (Aun así, este gran cambio apenas tuvo efecto sobre las afirmaciones acerca del buen diseño de criaturas *concretas* en un momento *concreto*, de ahí la ostensible continuidad entre Boyle y Darwin en cuestiones de adaptación.)

A grandes rasgos, el énfasis en la genealogía permite advertir que muchas características anatómicas pueden ser meras reliquias del pasado y no tienen por qué explicarse como adaptaciones para una función actual. Cuando Boyle se esfuerza en explicar por qué los murciélagos, ejemplares únicos entre las «aves» (en el sentido funcional de vertebrados voladores, pues para Boyle el término no tiene un sentido genealógico), tienen tantos rasgos que sólo se encuentran en las criaturas terrestres cubiertas de pelo, a uno le entran ganas de darle un codazo y decirle: «¿Es que no lo ves?; es muy simple: los murciélagos son mamíferos por descendencia». Pero, por supuesto, Boyle no estaba en condiciones de dar con esta solución en su tiempo. El papel a la vez limitante e inspirador de las visiones cosmológicas queda explícito en este ejemplo:

> Aunque se considera que los murciélagos son una clase despreciable de criaturas *[sic]*, pienso que pueden proporcionarnos un argumento nada despreciable para nuestros Unes actuales. Porque en este animal heteróclito [término *arcaico que significa anómalo*] se puede apreciar la fecunda habilidad del divino Autor, que ha creado un animal que vuela como los pájaros pero no está cubierto de plumas, sino de un tejido bastante distinto. Y en este pequeño animal también podemos observar… el respeto que el divino artista parece tener por la simetría de las partes en sus obras animadas y por su utilidad en relación a los lugares que [el animal] habita o frecuenta. Así, el murciélago, cuyo sino es actuar en ocasiones como ave que vuela libremente de aquí para allá y en ocasiones como animal terrestre, al modo de ese pequeño tetrápodo que es el ratón, tiene que estar equipado con partes adecuadas para estos destinos tan diferentes.
>
> (*Ibíd*., págs. 193-194)

Una diferencia más sutil sobre la misma cuestión es que la construcción mediante una secuencia histórica (y no mediante una creación en un estado de completa perfección) resuelve en el acto un problema que Boyle consideró asaz desconcertante (aunque no insuperable para su inteligencia): cómo explicar una función que tiene una utilidad actual para un organismo, pero que debería interpretarse como la consecuencia secundaria de una función principal u original diferente (pensemos en una moneda pequeña cuya función principal es el intercambio económico, pero que puede emplearse como destornillador en momentos de apuro). Al faltarle el concepto de cambio histórico, Boyle tiene que argumentar que su magnífica divinidad también predijo *todas* las utilidades secundarias:

> He visto y poseído un telescopio con forma de bastón y tal que podía tener usos muy diversos, pero todos ellos estaban en la mente y el designio del artífice.
>
> (*Ibíd.*, pág. 99)

Pensemos en la liberación intelectual que proporciona la alternativa asombrosamente simple de que las adaptaciones que se desarrollan para una función determinada pueden ser por casualidad aptas para otras funciones; como las plumas que, originadas como dispositivos para mantener el calor, se utilizan luego para volar. Una alternativa liberadora, pero inmensamente amenazadora (y, por ello, invisible para Boyle) para la creencia en un mundo joven y estático, lleno de causas finales que evidencian la existencia y las bondadosas intenciones de una deidad omnipresente.

La importancia de considerar las alternativas

A partir de mis extensas referencias a Boyle, y con la ventaja de nuestra perspectiva darwiniana, podemos apreciar los confi-

nes de su prisión conceptual. El mundo natural de Boyle carece de dimensión histórica, lo cual le obliga a contemplar cada característica mamífera del murciélago como creada expresamente para su función actual, no como una señal de su genealogía. Su visión de la naturaleza proclama una intención omnipresente (que ilustra la bondad del orden creado por Dios); por eso se siente desconcertado (o tiene que hacer conjeturas forzadas) ante la variedad de fenómenos que se explican correctamente dentro de sistemas basados en la genealogía (como los rasgos adaptados a funciones secundarias, los órganos vestigiales o utilidades basadas en criterios —como el *summum bonum* darwiniano del éxito reproductivo— irrelevantes para el Dios de Boyle).

Pero traicionaríamos el imperativo académico de la búsqueda de explicaciones si consideráramos la diferencia entre nuestra perspectiva del mundo vivo y la de Boyle como una excusa para lamentar su oscuridad o para exaltar nuestra sofisticada época frente a «aquellos malos tiempos» (dudo de que ninguno de nosotros hubiera alcanzado la altura intelectual de Boyle en su época). En cambio, nos ofrece una obvia lección de coherencia intelectual. Si un hombre tan brillante vivió en una prisión conceptual que ahora resulta tan evidente a nuestros ojos, ¿no podríamos estar encerrados también nosotros en sistemas de creencias que parecerán igual de absurdos a nuestros descendientes?

Al trazar la continuidad entre el pensamiento evolutivo anglófono de Boyle y el darwinismo moderno en el tema crucial de la adaptación o, en general, de las explicaciones funcionales, sugiero que podemos examinar provechosamente esta inveterada preferencia: nuestras inclinaciones quizá reflejen los mismos fenómenos de la naturaleza y las mismas prisiones conceptuales.

De hecho, existen enfoques alternativos de la teoría evolutiva, que a menudo tienen una larga tradición en el continente euro-

peo. La evolución no se reduce a las explicaciones adaptacionistas. La adaptación siempre será un tema básico del pensamiento evolutivo, porque los organismos tienden a estar bien diseñados y la selección natural es una fuerza probada y poderosa. Pero la adaptación no tiene por qué ser el resultado fundamental de la acción causal de la evolución, el fenómeno supremo y controlador de la historia de las transmutaciones de la vida. Quizá la perspectiva continental es más correcta y la mayor parte de las adaptaciones son modificaciones particulares de estructuras subyacentes producto de reglas de transformación y regularidades.

Éste no es el lugar para hacer una extensa recopilación o defensa de estas alternativas. (Como agnóstico en este asunto, ni siquiera me sentiría cómodo en este papel; es más, ni siquiera podemos describir la cuestión como una dicotomía.) Pero los enfoques estructuralistas son cada vez más influyentes y dan nueva vida a una antigua perspectiva que se remonta a la teoría preevolucionista de Geoffroy Saint-Hilaire. En unos famosos debates, celebrados en la Academia de las Ciencias de París en la década de 1830, este científico francés reivindicó el poder de las leyes de forma y los arquetipos ante el adaptacionismo no evolucionista de Georges Cuvier. D'Arcy Thompson mantuvo viva la perspectiva estructuralista, con un evolucionismo explícitamente antidarwiniano, en el mejor trabajo en prosa de la historia natural inglesa: *Sobre el crecimiento y la forma*. En la década de los noventa, Stuart Kauffman y Brian Goodwin han propuesto versiones modernas poderosas y provocativas, aunque imperfectas, que estudian la generación del orden biológico a partir de reglas estructurales y no por selección natural. (Kauffman, en particular, ha subrayado que el estructuralismo no tiene por qué oponerse al funcionalismo darwiniano, y que sus leyes de forma proporcionan orden «gratuito» a un sistema selectivo que puede así modificarse y añadir más regularidad.) Más llamativo aún es que el

asombroso progreso en la descodificación de la genética del desarrollo haya sacado a la luz un gran número de limitaciones estructurales por homología en una gran variedad de géneros complejos (artrópodos y cordados en particular) tanto en la determinación de los ejes corporales como en los sustratos para la formación de los ojos y la diferenciación de los segmentos. Parece que Geoffroy Saint-Hilaire estuvo asombrosamente acertado (había anhelado este resultado desde la publicación de mi *Ontogeny and Philogeny* en 1977, pero nunca me atreví a tener una auténtica esperanza de verlo confirmado) al señalar la homología entre el diseño corporal vertebrado y un diseño artrópodo invertido: la determinación homologa de la estructuración dorsoventral está realmente invertida en ambos taxones. (Los detalles pueden encontrarse en los artículos de Sasai et al. y Holley et al. en la lista de lecturas adicionales al final de este capítulo.)

A la luz de todo esto, un evolucionista puede preguntarse por qué debería preocuparle el dogmatismo del adaptacionismo ortodoxo. ¿Acaso el éxito del pensamiento estructuralista moderno no llevará al rechazo de ese punto de vista y la adopción de un pluralismo más adecuado? No me parece que vaya a ser así. El adaptacionismo darwiniano ortodoxo (al que B. Goodwin y N. Eldredge dan el nombre bastante apropiado de «ultradarwinismo») se mantiene bastante firme en los círculos evolucionistas anglófonos (no sé si debido al peso vestigial de una tradición adaptacionista que se remonta al siglo XVII o a la atracción que muchos sienten por las cosmovisiones simples y exhaustivas. No creo que ni la experiencia ni el raciocinio soporten una teoría tan exagerada y unidimensional).

No me preocupan demasiado las falacias del ultradarwinismo en el seno de la biología evolutiva, ya que la mayoría de profesionales entiende de sobra las limitaciones de tal visión (su prin-

cipal exponente en la actualidad, Richard Dawkins, parece mantener un compromiso estricto con este credo que cabe calificar de teleológico). Me preocupa más que practicantes de otras disciplinas que se zambullen en la biología evolutiva observando sólo el punto de vista tradicional, y se enamoran de su seductora simplicidad, cometan el gran error de pensar que han traducido correctamente otro campo de conocimiento en el suyo.

Dos buenos ejemplos son la obra del filósofo Daniel Dennett, quien ensalza un ultradarwinismo simplista y limitado, y esa caricatura de la auténtica riqueza del funcionalismo darwiniano que pasa por ser el paradigma de una «nueva» disciplina, y que se vende a sí misma con el nombre de «psicología evolucionista» (véase D. M. Buss, 1995, para un informe técnico y R. Wright para una versión «pop»). Los psicólogos evolucionistas se consideran adaptacionistas «sofisticados» porque no sostienen, como hicieron algunos sociobiólogos todavía más ingenuos en el último asalto de la discusión, que todos los rasgos de conducta universales deben ser adaptaciones en el sentido darwiniano. Estos nuevos apóstoles del ultradarwinismo afirman que muchos rasgos universales se han vuelto trágicamente no adaptativos en la sociedad moderna, aunque debieron haberlo sido inicialmente en la sabana africana (o donde fuera), pues la selección natural es la causa de la evolución y la adaptación es producto de la selección natural. Los psicólogos evolucionistas se aferran al ultradarwinismo cuando proponen un origen adaptativo para todos los comportamientos humanos universales, mientras que la auténtica alternativa sería reconocer la riqueza de los medios no adaptativos en virtud de los cuales surgen tales comportamientos (véase mi artículo con R. C. Lewontin acerca del principio de las enjutas arquitectónicas y otros mecanismos no adaptativos que serían en gran parte responsables de las características exclusivamente humanas de nuestra estructura mental).

La posición de Darwin en este extenso debate, que dura ya varios siglos, sigue siendo relevante y tiene más interés que el puramente histórico. Darwin fue un pensador sutil que sabía que la riqueza de la historia natural no podía explicarse de manera unidimensional, pero que apreciaba el poder de su propia teoría de la selección natural. A la vez que acentuó la preferencia anglófona por el adaptacionismo característica de su patrimonio intelectual, advirtió contra una dependencia demasiado exclusiva del mismo. De hecho, nada molestaba más a este hombre genial que la distorsión de su teoría en una versión de cartón piedra que equiparara la selección natural con la exclusividad y omnipotencia de la deidad de Boyle (en este sentido, estoy seguro de que Darwin habría evitado el ultradarwinismo). Por ejemplo, en la última edición de *El origen de las especies* (1872, pág. 395) escribió casi desesperadamente que:

> Puesto que mis conclusiones se han tergiversado mucho últimamente y se ha afirmado que atribuyo la modificación de las especies exclusivamente a la selección natural, me permito remarcar que en la primera edición de esta obra, y en las siguientes, puse en lugar bien visible (a saber, al final de la Introducción) las siguientes palabras: «Estoy convencido de que la selección natural ha sido el principal, pero no el exclusivo medio de modificación». Esto no ha servido de nada. Grande es el poder de la tergiversación continuada.

Pero Darwin no era un pluralista sin preferencias. Su visión del mundo elevaba el argumento funcional sobre todos los demás al definir la adaptación como el asunto central de la evolución (véanse las citas del principio). Al hacer esto, expresaba su fidelidad a una tradición nacional que se remontaba a Boyle y sus compatriotas, en los orígenes de la ciencia moderna.

Cuando hablé por última vez en el Darwin College, en la gran conmemoración del centenario de la muerte de Darwin, finalicé mi presentación con una cita de William Bateson, un gran evolucionista no darwiniano que, sin embargo, captó por qué Darwin destacaba entre los científicos ingleses. Como mi artícu-

lo trata de la continuidad intergeneracional a través de la principal transformación intelectual de la historia de la biología, mantendré una pequeña continuidad personal citando a Bateson de nuevo, en el mismo lugar, puesto que sus palabras evocan el pluralismo explicativo que debemos defender si queremos comprender las complejidades de la evolución:

> Tenemos que honrar en él no el mérito de un logro finito, sino el poder creativo con el que inauguró una línea de investigación infinita tanto en variedad como en extensión.
>
> (Bateson, 1909)

BIBLIOGRAFÍA

Bateson, W., «Heredity and variation in modern lights», en A. C. Seward (ed.), *Darwin and Modern Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1909, págs. 85-101.

Boyle, R., *A Disquisition About the Final Causes of Natural Things Wherein it is inquir'd Whether, and (If at All) With What Caution, a Naturalist Should Admit Them*, John Taylor, Londres, 1688.

Buss, D. M., «Evolutionary psychology: a new paradigm for psychological Science», *Psychological Inquiry* 6 (1995), págs. 1-30.

Darwin, C. R., *The Origin of Species*, John Murray, Londres, 1859.

Darwin, C. R. *The Origin of Species*, 6ª edición, John Murray, Londres, 1872. [Trad. esp.: *El origen de las especies*, Espasa-Calpe, Madrid, 2001.]

Dawkins, R., *A River Gut of Eden*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1995. [Trad. esp.: *El río del Edén*, Crítica, Barcelona, 2001.]

Dennett, D., *Darwin's Dangerous idea*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995. [Trad. esp.: *La peligrosa idea de Darwin*, Galaxia Gutenberg, Barcelona. 2000.]

Eldredge, N., *Reinventing Darwin*, J. Wiley, Nueva York, 1995.

Goodwin, B., *How the Leopard Changed Its Spots*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1994. [Trad. esp.: *Las manchas del leopardo*, Tusquets Editores (Metatemas 51), Barcelona, 1998.]

Gould, S. J., *Ontogeny and Philogeny*, Belknap Press de Harvard University Press, Cambridge (Ma), 1977. [Trad. esp.: *La falsa medida del hombre*, Crítica, Barcelona, 1997.]

Gould, S. J., «Exaptation: A crucial tool for an evolutionary psychology», *Journal of Social Issues* 47 (1991), núm. 3, págs. 43-65.

Gould, S. J. y R. C. Lewontin, «The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: A critique of the adaptationist programme», *Proceedings of the Royal Society of London B* 205 (1979), págs. 581-598.

Holley, S. A., P. D. Jackson, Y. Sasai, B. Lu, F. M. De Robertis, F. M. Hoffman y E. L. Ferguson, «A conserved system for dorsal-ventral patterning in insects and vertebrates involving *sog* and *chordin*», *Nature* 376 (1995), págs. 249-253.

Kauffman, S., *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1993.

Mayr, F., «How to carry out the adaptationist program?», *The American Naturalist* 121 (1983), núm. 3, págs. 324-334.

Paley, W., *Natural Theology*, R. Faulder, Londres, 1802.

Sinai, Y., B. Lu, H. Steinteisser, D. Ceissert, L. K. Gout y F. M. De Robertis, «*Xenopus chordin*: a novel dorsalizing factor activated by organiser-specific homeobox genes», *Cell* 79 (1994), págs. 779-790.

Thompson, D'Arcy W., *On growth and Form*, MacMillan, Londres, 1917.

Thompson, D'Arcy W., *On Growth and Form*, 2ª edición, MacMillan, Londres, 1942. [Trad. esp.: *Sobre el crecimiento y la forma*, Blume, Madrid, 1980.]

Wright, R., *The Moral Animal: The New Science of Evolutionary Psychology*, Pantheon, Nueva York, 1994.

La evolución del desarrollo celular

Lewis Wolpert

Lewis Wolpert, miembro de la Royal Society, es catedrático de biología aplicada a la medicina en el Colegio Universitario de Londres. Su interés principal es la morfogénesis embrionaria. Ha escrito, entre otras obras, *Triumph of the Embryo* (1991).

El desarrollo celular es el mayor logro de la evolución natural. Esto puede sonar algo presuntuoso si comparamos la aparente sencillez de la célula con la complejidad de organismos como los seres humanos, dotados de cerebros extraordinarios. Pero, en términos evolutivos, estos organismos pluricelulares no aparecieron hasta que las células hubieron evolucionado. Es más, creo que, una vez surgida la célula eucariota (dotada de movimiento, un núcleo y orgánulos como las mitocondrias) a partir de bacterias más sencillas, la evolución de estructuras complejas como el cerebro fue, en comparación, relativamente simple.

La evolución como modificación del desarrollo

Los procesos del desarrollo son fundamentales para la evolución de los seres pluricelulares. La evolución avanza mediante modificaciones en el programa de desarrollo del embrión, que a su vez determinan las características del organismo adulto. Esta modificación se debe a cambios en los genes que controlan el de-

sarrollo. En palabras del genetista molecular francés François Jacob, la evolución hace chapuzas con los embriones, utilizando sus piezas para construir nuevas estructuras. Este proceder salta a la vista cuando observamos los embriones jóvenes de los vertebrados, todos asombrosamente parecidos entre sí en cierta etapa del desarrollo (la llamada fase filotípica) a partir de la cual se diferencian (figura 1). La evolución chapucea con el plan corporal básico.

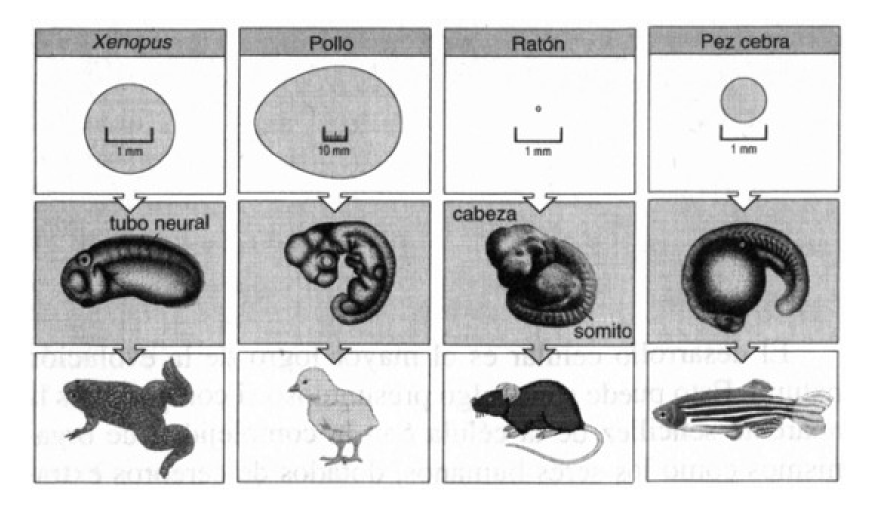


Figura 1. Los embriones de los vertebrados convergen en una fase filotípica común y luego divergen. Arriba, el huevo fecundado; en el centro, la fase filotípica; abajo, el estado adulto.

El desarrollo de las extremidades es un buen ejemplo. Mientras que la forma de las extremidades se ha mantenido estable en muchos vertebrados terrestres, su desarrollo ha sido «chapuceado» para producir alas en las aves y los murciélagos, patas en los caballos y manos en los seres humanos. Es más, las propias extremidades evolucionaron a partir de las aletas de los peces. Otros ejemplos espectaculares los proporcionan los huesos del oído medio de los mamíferos, que en nuestros antepasados reptilianos formaban parte de la articulación de la mandíbula, y el sistema

genitourinario, en el que el riñón primitivo se modificó para formar parte del sistema reproductor y evolucionó un nuevo riñón.

Otra característica fundamental de la evolución ha sido la modificación del crecimiento. Esto puede observarse en la evolución de la pezuña del caballo, cuyos dedos laterales crecen más despacio que los centrales. A medida que el caballo crece, los dedos laterales se hacen mucho más pequeños que los centrales y el dedo medio acaba soportando la mayor parte del peso. Los cambios en la estructura craneal de los vertebrados también se deber básicamente al proceso de crecimiento (figura 2). Tal como señaló D'Arcy Thompson en su libro *Sobre el crecimiento y la forma*, el crecimiento diferencial puede explicar las diferencias básicas en la forma de los cráneos.

La evolución puede contemplarse como la modificación del desarrollo. Así pues, es esencial comprender tanto el desarrollo mismo como su evolución.

Desarrollo

La relación entre las células y los organismos pluricelulares se establece, salvo raras excepciones, a través del desarrollo de una única célula: el huevo. (Una excepción son los mixomicetes celulares, cuyos cuerpos fructíferos se desarrollan por agregación de gran número de amebas.) Todos los animales y plantas que vemos a nuestro alrededor se han desarrollado a partir de una única célula, el huevo fecundado, cuyo desarrollo se caracteriza por una sucesión de divisiones celulares que originan una masa de entre un centenar y un millar de células más pequeñas. Esta masa de células primordiales se diferencia en muchos tipos celulares distintos, como las células musculares y las cartilaginosas. Estos tipos celulares producen a su vez estructuras bien defini-

das, como las extremidades, en un proceso denominado formación de patrones. Las diferencias entre los vertebrados, sean aves, seres humanos, hipopótamos o chimpancés, se deben fundamentalmente a esta formación de patrones, a la organización espacial de las células, y no a diferencias significativas entre los tipos celulares que los componen. Por poner un ejemplo, los seres humanos no tenemos ningún tipo celular que no esté presente en los chimpancés. Un tercer proceso de desarrollo es el cambio en la disposición de las capas celulares. En la gastrulación, las células superficiales que formarán el conducto digestivo y el esqueleto se desplazan hacia el interior del embrión. La organización del embrión se completa cuando éste es aún muy pequeño (las extremidades humanas adquieren su estructura antes de que el embrión supere el centímetro de longitud) y las estructuras grandes son producto del crecimiento en etapas posteriores. Toda esta estructuración implica un número relativamente pequeño de células, y las interacciones celulares son de carácter local. Una vez se ha establecido el plan corporal básico, el desarrollo de órganos específicos, como los ojos o las extremidades, es relativamente autónomo.

El resultado del desarrollo embrionario está determinado por el comportamiento de las células individuales, y este comportamiento celular está dirigido por el ADN. No obstante, la actuación del material genético es más bien pasiva. El ADN sólo contiene códigos para la fabricación de proteínas, que a su vez determinan cómo se comporta la célula. Las enzimas que catalizan las reacciones celulares básicas son proteínas, que también forman parte de la composición de elementos estructurales como el citoesqueleto y la membrana. Las células se caracterizan por las proteínas específicas que contienen (como la queratina de la piel o la hemoglobina de los glóbulos rojos) distintas de las proteínas genéricas que mantienen las funciones celulares básicas. Otro ti-

po importante de proteína son los factores de transcripción que controlan la activación y desactivación de los genes y, con ello, los tipos de proteínas que fabrica la célula. Así pues, el tipo y el estado de la célula están determinados por la activación o desactivación de ciertos genes y, en consecuencia, por las proteínas presentes. El ADN del embrión no contiene una descripción del organismo adulto sino, más bien, un conjunto de instrucciones para fabricarlo mediante una secuencia de síntesis de proteínas. La papiroflexia es un buen modelo para este proceso. En este caso, las instrucciones corresponderían a la síntesis de proteínas específicas a medida que procede el desarrollo.

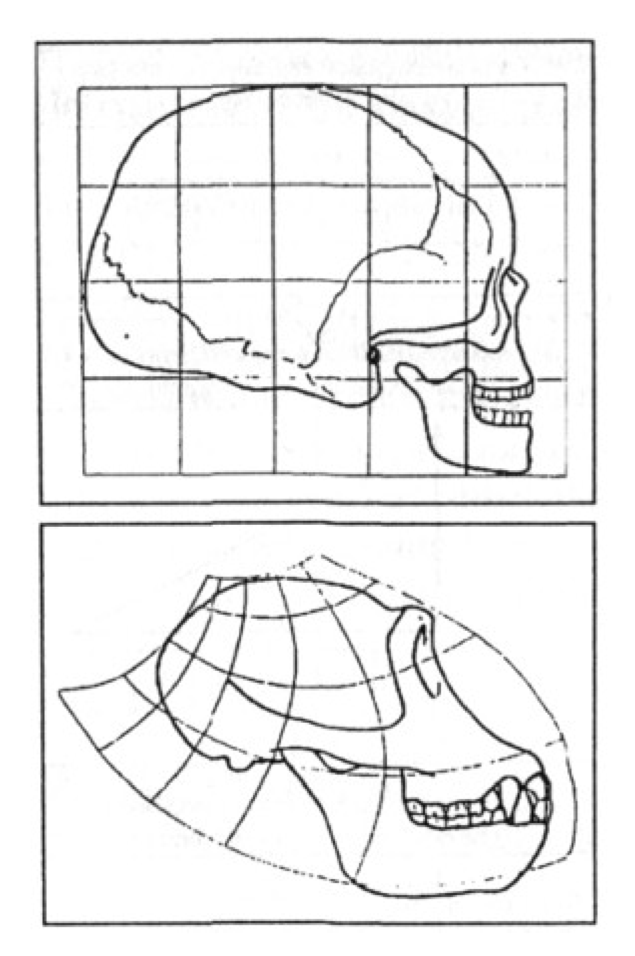


Figura 2. Las formas de los cráneos de un ser humano (arriba) y un chimpancé (abajo) reflejan básicamente cambios de crecimiento diferencial.

A continuación describiré algunos de los mecanismos de estructuración básicos implicados en este proceso, pues para entender la evolución del desarrollo embrionario es necesario conocer sus características principales.

Uno de los mecanismos de formación de patrones se basa en la información posicional (figura 3). La idea básica es que la localización de las células no se especifica mediante un sistema de coordenadas, sino que éstas adquieren identidades posicionales (o direcciones) respecto de ciertas fronteras. Una vez fijada la identidad posicional, la célula puede interpretarla mediante un com-

portamiento específico que depende de su pasado. Este cambio de comportamiento puede originar un tipo celular diferenciado o una modificación de la forma o la adherencia de la célula. Otra interpretación posible es la especificación de un programa de crecimiento. Una característica importante de este mecanismo de estructuración es que no hay una relación simple entre la especificación posicional y la estructura final, sino que ambas están disociadas. Es más, una de las características más atractivas de la información posicional es que las mismas identidades posicionales pueden especificar un gran número de estructuras, lo cual está apoyado por numerosas observaciones. El carácter de cada estructura depende de la manera en que las células interpretan su identidad posicional.

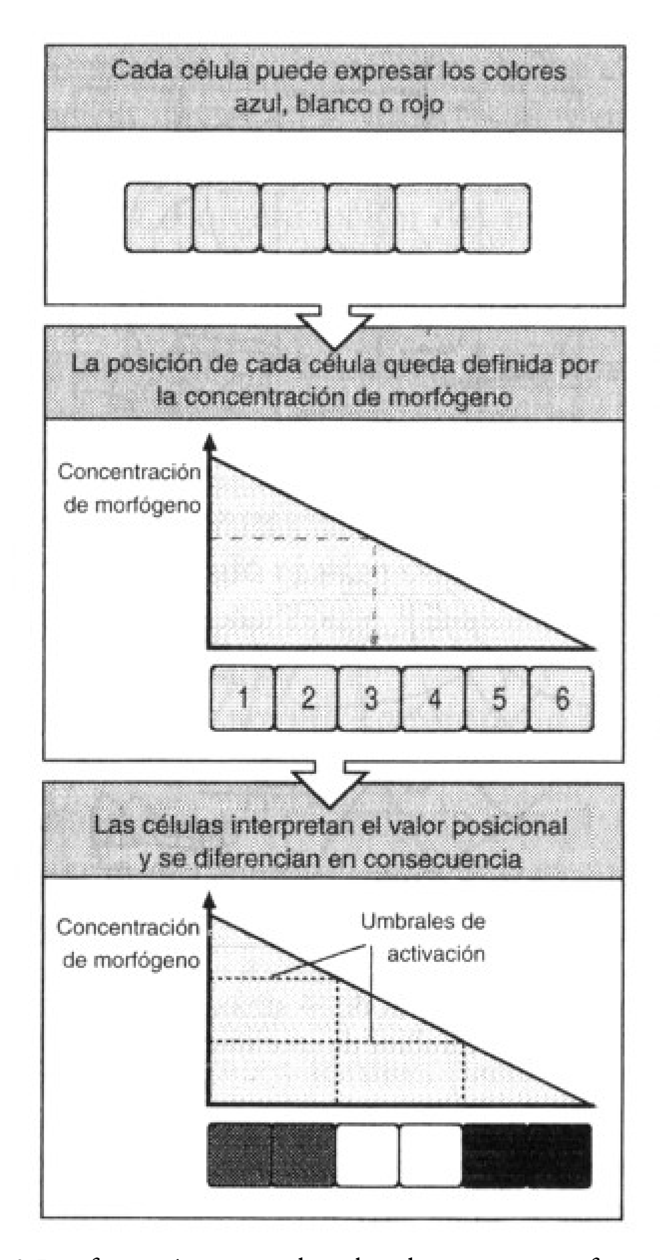


Figura 3. La información posicional puede utilizarse para especificar patrones espaciales. Cada posición queda especificada por la concentración local de un «morfógeno» que es leída por las células.

La información posicional puede proporcionar un concepto unificador para la comprensión del desarrollo regulado de estructuras muy diversas. En principio, las únicas interacciones in-

tercelulares implicadas son las que especifican la posición. Es más, las mismas señales e identidades posicionales pueden utilizarse para generar estructuras bastante diferentes, cuya variedad reflejaría tanto la constitución genética de la célula como la historia de su desarrollo.

La especificación del diseño corporal

Las primeras etapas del desarrollo implican la especificación del diseño corporal, es decir, la determinación de los ejes principales (anteroposterior y dorsoventral) y de regiones concretas como, por ejemplo, los lugares donde se forman la cabeza y las extremidades. Esto define un bosquejo del futuro organismo y, en los animales segmentados, establece un patrón periódico. En los vertebrados, la especificación del diseño corporal hace que todos los embriones pasen por una etapa filotípica común (figura 1) en la que es muy difícil distinguir entre embriones de especies diferentes y a partir de la cual divergen los desarrollos posteriores. También se aprecia una divergencia previa a la etapa filotípica cuando retrocedemos hasta el huevo inicial. Las primeras etapas del desarrollo de mamíferos y ranas son bastante diferentes, pero ambos tipos de embriones convergen luego en la fase filotípica. Esta cuestión evolutiva es tan importante como la conservación de la etapa filotípica.

Los detalles de las primeras etapas del desarrollo no deben preocupamos, de manera que nos centraremos en la especificación del diseño corporal que conduce a la fase filotípica. Empezaremos por los insectos, que también pasan por una fase filotípica, porque son los organismos de los que se tiene más información acerca del control genético de las primeras etapas del desarrollo embrionario. La mosca del vinagre, del género *Drosophila*,

es el organismo mejor estudiado ahora mismo, y la comprensión de las primeras etapas de su desarrollo ha tenido una gran repercusión en el estudio de otros sistemas.

Los ejes anteroposterior y dorsoventral de *Drosophila* se especifican ya en la fase de huevo. Así, existe un gen llamado *bicoid* que codifica un factor de transcripción cuyo ARN mensajero se localiza en el extremo anterior del huevo. Tras la fecundación se establece un gradiente de proteína bicoide a lo largo del eje anteroposterior (figura 4) que, al parecer, proporciona información posicional a las células del embrión (aunque en estas primeras etapas no hay paredes celulares entre los núcleos). De esta forma las células pueden «conocer» su distancia al extremo anterior a partir de la concentración de proteína bicoide. A ciertas concentraciones críticas se activan determinados genes que, a su vez, codifican factores de transcripción capaces de activar o inhibir otros genes. Se establece así una sucesión de activaciones de genes que determina la regionalización de varios factores de transcripción de proteínas. Estos factores activan pares de genes con siete «bandas» de actividad de unos pocos núcleos de amplitud, lo cual define catorce parasegmentos precursores de los segmentos corporales de la larva y la mosca adulta. Cada una de las bandas de actividad de estos genes queda especificada por la concentración local de los factores de transcripción que actúan en la región controlada por los genes.

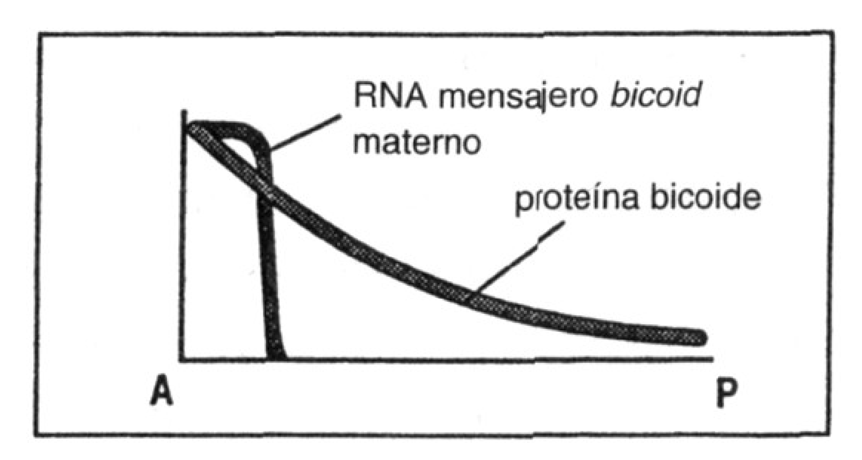


Figura 4. La información posicional en el huevo de *Drosophila* se especifica inicialmente mediante el gradiente de concentración de la proteína bicoide, que se sintetiza en el extremo anterior del huevo (A) y se difunde hacia el extremo posterior del mismo.

En una etapa posterior, equivalente a la fase filotípica, cada segmento adquiere una identidad específica en virtud de los genes activos en su interior. Estos genes codifican factores de transcripción que confieren identidad posicional a los segmentos, y pertenecen al denominado «complejo génico homeótico». Los genes de este complejo se localizan en un mismo cromosoma y tienen algunas características interesantes. En primer lugar, se llaman así porque sus mutaciones pueden producir homeosis, es decir, transformaciones de una estructura en otra. Por ejemplo, hay mutaciones de estos genes que hacen que se desarrolle una pata allí donde debería formarse una antena, o que un segmento adquiera la identidad de otro adyacente, lo que da lugar a una mosca de cuatro alas. En segundo lugar, el orden de los genes en el cromosoma coincide con el orden en el que se expresan a lo largo del eje anteroposterior. Así, los genes situados en posición anterior y posterior en el complejo se expresan en el extremo anterior y posterior del embrión, respectivamente. En tercer lugar, todos los genes contienen una pequeña región similar cono-

cida como *homeobox, o* «caja homeótica», que codifica una parte de la proteína que se liga al ADN.

La presencia de esta caja homeótica es importante porque se han encontrado regiones parecidas en casi todos los animales. Los vertebrados poseen cuatro complejos génicos *homeobox*, cuya expresión en el eje anteroposterior sigue el mismo orden observado en la mosca. En general, se piensa que los genes de las cajas homeóticas registran identidades posicionales a lo largo del eje principal del cuerpo. Es como si la evolución hubiera encontrado una manera satisfactoria de registrar las diferencias posicionales y la hubiera usado una y otra vez. Todos estos complejos génicos tienen su origen en algún antepasado primitivo, y los cuatro complejos de los vertebrados deben haber surgido mediante duplicaciones de esos mismos genes en un antepasado posterior.

Por desgracia, en el caso de los vertebrados aún no se sabe bien cómo se consigue que la información genética del complejo *homeobox* se traduzca en la posición correcta, pero es seguro que hay implicado algún mecanismo de señalización intercelular.

Alas y extremidades

El desarrollo de las extremidades de los vertebrados no sólo es importante por sí mismo, sino que también nos proporciona un modelo útil. Existe una gran similitud entre los procesos de estructuración de las extremidades y los de especificación del plan corporal.

Las extremidades del pollo brotan de los costados, después de lo cual se especifican sucesivamente los elementos esqueléticos: primero el húmero, luego el radio y el cúbito, luego la muñeca y finalmente los dedos. Los dedos son bastante peculiares y, por convención, se designan con los números 2, 3 y 4, siendo 2 el

anterior y 4 el posterior. (En nuestras manos, el dedo meñique es el posterior.) Centrémonos ahora en la estructuración de los dedos.

Al parecer, la región polarizadora, situada en el borde posterior del esbozo de la extremidad, es la fuente de alguna señal. Si se injerta una región polarizadora en el margen anterior de otra extremidad se obtiene un miembro que es su imagen especular (figuras 5a y 5b), de manera que en vez del patrón normal 2 3 4 tenemos el patrón 4 3 2 2 3 4. La región polarizadora establece un nuevo conjunto de identidades posicionales en la región anterior del esbozo, posiblemente una señal decreciente que forma el dedo 4 a un umbral de activación alto y el dedo 3 a un umbral de activación bajo. Estudios recientes muestran que el gen *sonic hedgehog* se expresa en la región polarizadora, y la proteína que codifica es una buena candidata para esta señal posicional.

Esta misma pauta de señalización a lo largo del eje anteroposterior se encuentra en los esbozos de los miembros anteriores y posteriores de todos los amniotas, lo que explica que una región polarizadora de ratón pueda especificar imágenes especulares de miembros en el pollo. Es más, el gen *hedgehog* podría estar implicado en la señalización posicional de otras regiones del embrión, como puede ser la especificación del eje principal del cuerpo y la disposición de las neuronas en la médula espinal. Esto sugiere que una misma señal de posición puede actuar en diferentes etapas del desarrollo.

También existe un parecido extraordinario entre el desarrollo de las extremidades de los vertebrados y el del ala de *Drosophila*. Aquí el gen *hedgehog*, que vuelve a estar implicado, se activa en una banda estrecha a lo largo del eje del ala en desarrollo. Parece ser que este gen especifica un «morfógeno» cuya difusión originaría la estructura de las regiones anterior y posterior, de manera

que, cuando se expresa en una posición inusual, actúa como si fuera el injerto de una región polarizadora y especifica un nuevo conjunto de estructuras alares.

Conservación de los mecanismos del desarrollo

Esta breve disquisición sobre los procesos del desarrollo muestra que a lo largo de la evolución se han conservado mecanismos comunes a sistemas tan diversos como los insectos y los vertebrados. Los genes que especifican el estado celular y las moléculas señalizadoras pueden ser similares en organismos distintos. Buen ejemplo de ello son los complejos *homeobox* y la familia de moléculas señalizadoras *hedgehog*, que se utilizan una y otra vez. Un ejemplo reciente y sorprendente es el descubrimiento de que genes similares están implicados en el desarrollo de los ojos de insectos y vertebrados.

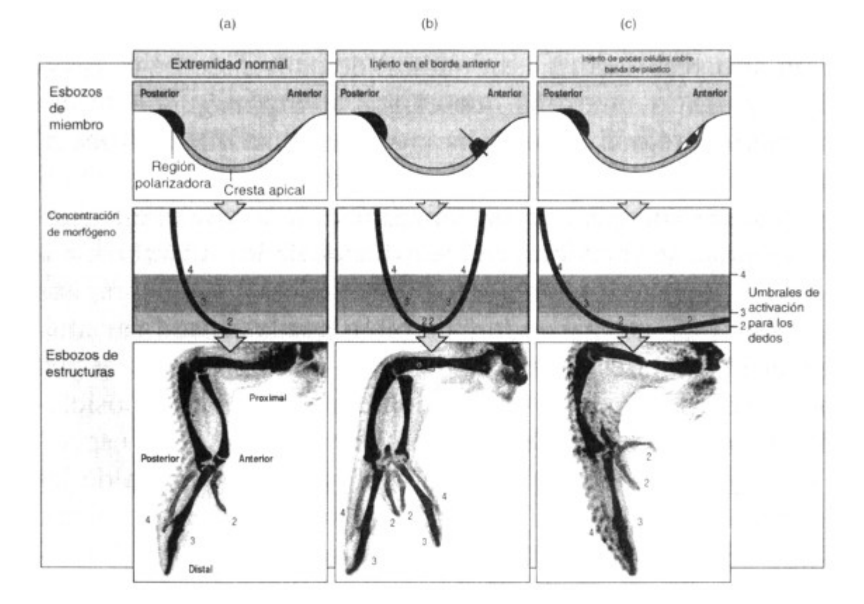


Figura 5. (a) La región polarizadora de la extremidad del pollo determina la identidad de los dedos. El mecanismo podría basarse en un morfógeno difusivo producido por la región polarizadora. *(b)* Si se injerta una región polarizadora en la región anterior, aparece una extremidad lateralmente invertida, *(c)* Si se injertan sólo unas pocas células polarizadoras la señal se atenúa y sólo se produce una duplicación parcial.

Esta conservación de los mecanismos del desarrollo embrionario no debe eclipsar su innegable diversidad, sobre todo en las primeras etapas. Los animales y las plantas utilizan una gran diversidad de mecanismos para establecer los ejes en el huevo. El eje dorsoventral del embrión de los anfibios lo especifica el punto de entrada del espermatozoide, mientras que el óvulo de los mamíferos tiene simetría esférica y sus ejes no se especifican hasta mucho más tarde. En la ascidia, el futuro músculo se especifica en gran parte por procesos citoplasmáticos y no mediante interacciones celulares.

Sin embargo, en cierto sentido, la evolución ha sido conservadora, incluso indolente, a la hora de inventar mecanismos de desarrollo. Una vez se «descubrieron» mecanismos capaces de generar organismos complejos, éstos se utilizaron una y otra vez. Así,

los mecanismos morfogenéticos basados en la información posicional y la generación de estructuras periódicas producen una variedad enorme, casi infinita, de patrones y estructuras, sobre todo cuando se acoplan con cambios de forma y crecimiento. No hay nada especial en el desarrollo del cerebro humano, que en su conjunto hace uso de mecanismos heredados de nuestros antepasados primitivos.

El origen del embrión

La célula es un sistema maravillosamente complejo, tanto que la interacción entre sus componentes es superior en muchos órdenes de magnitud a la que existe entre las células de un embrión. En este sentido, podemos decir que una célula es mucho más compleja que un embrión. El desarrollo embrionario no es más que el resultado de actividades celulares modificadas de forma coordinada.

La aparición de la célula hace unos 3000 millones de años puede considerarse como la «gran explosión» de la evolución biológica, si bien fue un proceso que requirió mucho tiempo. En comparación, el origen del desarrollo embrionario puede verse como una «pequeña explosión», posterior a la evolución de la célula eucariota. ¿Qué se requería, ni términos generales, para que evolucionaran los procesos del desarrollo? ¿Cómo se originaron el huevo, la generación de patrones y los cambios de forma? Puesto que el desarrollo embrionario requiere la formación de un organismo pluricelular a partir de una única célula, el origen del huevo es un problema fundamental.

La evolución del desarrollo está ligada al origen de los seres pluricelulares, los metazoos. Se cree que los eucariotas unicelulares existen desde hace unos 1400 millones de años, mientras que

los restos más antiguos de metazoos tienen unos 800 millones de años de edad. Esto sugiere que la transición de los eucariotas unicelulares a la pluricelularidad fue difícil y requirió cientos de millones de años. No obstante, está claro que el registro fósil de aquellos delicados ancestros primitivos es muy fragmentario e incompleto. Lo que yo creo es que, una vez hubo células eucariotas con capacidad para replicarse y desplazarse, los elementos básicos que requiere el desarrollo ya estaban disponibles, por lo que la transición a la pluricelularidad pudo ser relativamente sencilla. Aun así, tuvieron que transcurrir unos cuantos cientos de millones de años hasta la explosión del Cámbrico, momento a partir del cual se encuentran fósiles de animales reconocibles como tales.

Los procesos básicos (diferenciación, organización espacial, cambio de forma y crecimiento) ya estaban presentes en la célula eucariota. El ciclo celular (es decir, la secuencia de eventos que determina el crecimiento y división de la célula) ilustra todos estos procesos.

En el ciclo celular tiene lugar una secuencia de actividades génicas que puede considerarse un precursor simple de un programa de desarrollo. A medida que la célula crece se activan y desactivan genes en las distintas fases del ciclo celular, las cuales pueden verse como estados diferenciados. También se producen movimientos intracelulares y una reordenación espacial que asegura el reparto equitativo de los cromosomas entre las dos células hijas. Es más, a medida que las sustancias se acumulan, aparecen umbrales de activación que marcan la transición de una fase a la siguiente. El mecanismo de división celular, la mitosis, permitía también la diferenciación de las células hijas a través de la distribución desigual de los componentes celulares durante la di-

visión celular. Esta característica ya está presente en las levaduras, cuyas células hijas pueden tener «sexos» diferentes.

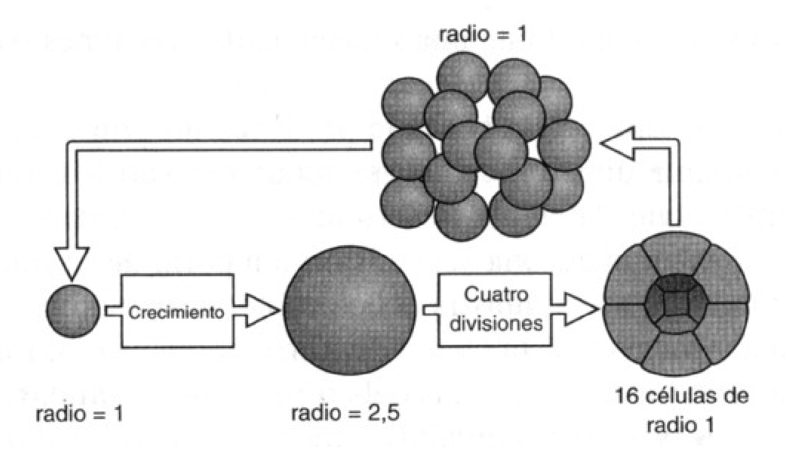


Figura 6. El origen del embrión a partir del agrandamiento y posterior división múltiple de una célula.

A continuación expondré un camino hipotético por el que la célula eucariota pudo llevar al desarrollo embrionario. Un requisito central es que cada etapa tenga una ventaja selectiva y haya continuidad entre las etapas. Los saltos grandes (monstruos prometedores) no están permitidos. Aun así, reconozco que mi hipótesis no es mucho mejor que alguno de *Los cuentos de así fue* de Rudyard Kipling, del estilo de «Así fue como el leopardo consiguió sus manchas» o «Así fue como el dromedario consiguió su joroba».

Hay dos teorías principales sobre el origen de los metazoos y, por ende, sobre el origen del desarrollo embrionario. La primera especula que la pluricelularidad se derivó de la agregación de dos o más células para formar una colonia; la segunda, en cambio, propone un crecimiento celular con multiplicación nuclear y establecimiento posterior de fronteras celulares. Mi propuesta es una variante de esta última teoría. Lo que pretendo ofrecer es un mecanismo que permita explicar la identidad genética de todas las células del embrión y, sobre todo, el origen del huevo. El me-

canismo se basa en el crecimiento de una sola célula más allá de su tamaño normal, seguido de una secuencia de divisiones o escisiones.

Para que una célula solitaria produzca un grupo pluricelular mediante división celular se requieren varios cambios. En primer lugar, la célula tiene que superar su tamaño habitual, lo que requiere una suspensión temporal de la mitosis. En segundo lugar, la mitosis debe desbloquearse en la célula agrandada para que ésta pueda dividirse varias veces. En tercer y último lugar, las células deben permanecer unidas.

Los dos primeros requisitos implican la modificación del ciclo celular, y es relativamente sencillo sugerir procesos basados en mecanismos de control observables en las células actuales. Se ha visto que, durante la mitosis, el tamaño de las levaduras se incrementa en un medio de cultivo rico y disminuye en un medio pobre. Es muy posible, por lo tanto, que el momento de la transición dependa de señales ambientales. Por ejemplo, una célula que creciera en un medio rico podría aumentar de tamaño y, tras ser trasplantada a un medio pobre, experimentar dos divisiones seguidas sin crecimiento. Así ocurre en el protozoo *Chlamydomonas*, cuyas células se dividen en cuatro o incluso ocho en cada ciclo celular cuando la tasa de crecimiento es rápida.

Así pues, podemos imaginar una célula que incremente su diámetro dos veces y media y luego se divida cuatro veces para producir dieciséis células hijas (figura 6). Supongamos además que se cumple el tercer requisito, es decir, que las células se mantengan juntas y formen una esfera hueca. Esto último requiere divisiones celulares orientadas o uniones intercelulares en la superficie exterior, lo cual no parece muy difícil de conseguir.

El resultado final de estos cambios sería un incremento del tamaño celular en un medio rico, conducente a una esfera plurice-

lular en un medio pobre. Esto podría ser una ventaja selectiva si las células fueran ciliadas, pues la esfera podría desplazarse más deprisa en busca de ambientes más ricos. Tenemos así por primera vez una selección positiva del estado pluricelular en un medio pobre, y dicho estado habría sido inducido por el ambiente.

Otro «cuento de así fue» para el origen de la pluricelularidad y del huevo se basa en la muerte celular y el canibalismo. Imaginemos una mutación tal que, cuando una célula se divide, las dos células hijas permanecen unidas. Esto podría haber proporcionado a este pequeño organismo una ventaja selectiva muy importante sobre los organismos unicelulares en momentos de penuria: mientras estos últimos morían de hambre, nuestro antepasado bicelular podría haber sobrevivido a los malos tiempos utilizando una célula como alimento de la otra. La célula superviviente sería el origen del huevo, pues las células somáticas de todos los organismos pluricelulares que se desarrollan a partir de un huevo se sacrifican para la supervivencia de éste. En muchos organismos hay células especiales cuya única función es asistir el desarrollo del huevo. Así pues, nuestros orígenes podrían radicar en el canibalismo o en el suicidio altruista.

A continuación propondré un mecanismo basado en un proceso similar hasta cierto punto al efecto Baldwin, formulado a principios de siglo y generalizado por el embriólogo británico Conrad Waddington en lo que él llamaba «asimilación genética». En esencia, este mecanismo implica la inclusión en el programa de desarrollo de un efecto de origen ambiental a través del reemplazo de la señal ambiental por una señal embrionaria. Mediante el efecto Baldwin podemos imaginar mutaciones tales que, en cualquier tipo de medio, las células superen su tamaño normal y luego se dividan varias veces. Una señal ambiental habría sido asimilada por los genes y, en cierto sentido, se habría incorpora-

do al programa. La ventaja selectiva de la pluricelularidad podría ser una mayor velocidad de natación, una mejora en la alimentación o la compartición de metabolitos.

Sólo falta un paso más para que la evolución dé lugar al embrión: que las células individuales se separen y el programa empiece de nuevo. Esto podría haber sucedido cuando las células hubieran crecido demasiado para mantenerse unidas. Luego cada célula podría haber vuelto a pasar por el mismo programa, y habría surgido el desarrollo embrionario. Esta etapa simple, aunque crucial, pudo requerir mucho tiempo. En este embrión primitivo, al que llamaremos *Blastaea*, cada célula se comporta como un huevo y no hay organización espacial. Los orígenes de la estructuración y la organización espacial, que llevan a la especialización celular, podrían encontrarse en el momento en que los mecanismos de los ciclos celulares alterados generaran una esfera hueca, formada por una única capa de células.

La clave del desarrollo es la generación de diferencias entre las células. Sólo así puede estructurarse el organismo para que se produzcan cambios de forma organizados y se diferencien tipos celulares en lugares específicos. El desarrollo del alga *Volvox* ilustra algunos de estos principios. La división de su huevo produce células somáticas y germinales distribuidas en forma de esfera hueca. La línea germinal se especifica mediante escisiones desiguales de las que surgen células hijas de tamaños diferentes, las mayores de las cuales dan lugar a células germinales.

¿Cómo evolucionaron estos mecanismos basados en la información posicional? Supongamos que los *Blastaea* primitivos habitaran en el fondo del mar (figura 7). No es absurdo suponer que las células en contacto con el sustrato se diferenciaran en cuanto a metabolismo o receptores superficiales. Con el tiempo, esta señal ambiental podría haber inducido una sucesión de acti-

vidades a partir del punto de contacto, que afectaría a las células locales y produciría señales capaces de afectar a células distantes. Por ejemplo, las células capaces de unirse al punto de contacto podrían tener una ventaja selectiva. Otra ventaja podría derivarse de la invaginación de las células en el punto de contacto. Fuese cual fuese la ventaja, una señal ambiental produciría un cambio local en el organismo, que se haría más complejo con el tiempo. Esto podría acarrear la supresión del crecimiento de las células adyacentes y, en consecuencia, la restricción de la reproducción en el extremo posterior del embrión. De esta forma se especificaría un eje embrionario. El cambio gradual de la señal a lo largo de este eje podría haber originado un patrón basado en la información posicional. De hecho, hay ejemplos actuales de estos procesos, como son la polarización del huevo del alga *Fucus* por la luz o la determinación del eje dorsoventral de los anfibios a partir del lugar de entrada del espermatozoide en el óvulo.

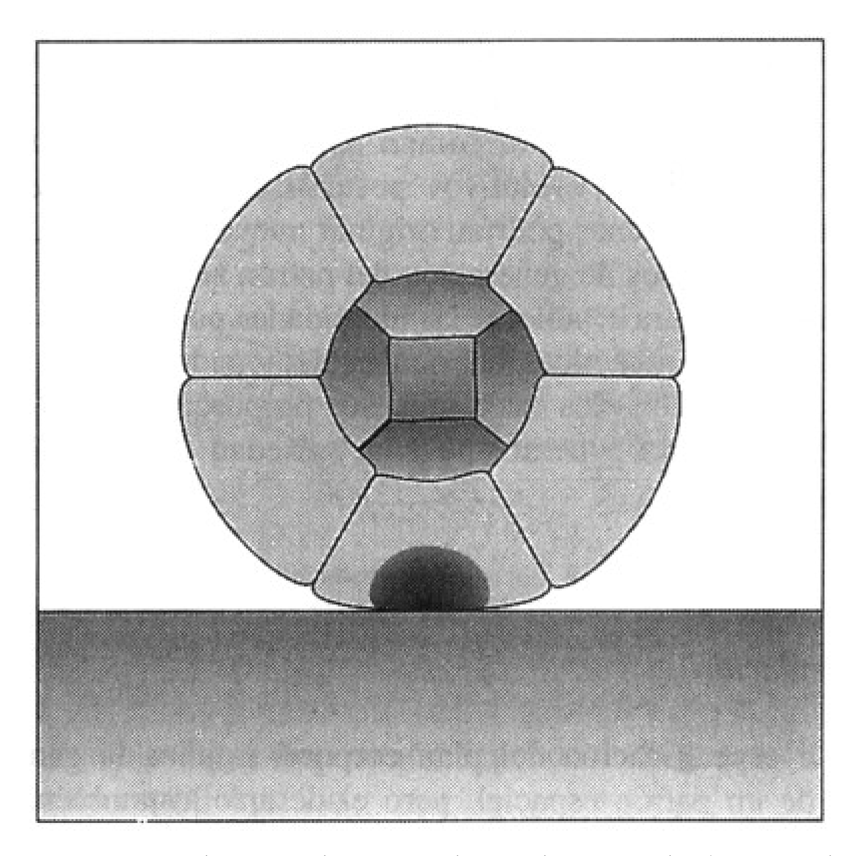


Figura 7. Origen hipotético de un eje en el punto de contacto de *Blastaea* con el sustrato.

Volviendo al efecto Baldwin, podemos conjeturar cómo se incorporó al programa de desarrollo la especificación de un eje ambientalmente inducido. Todos los elementos para dicha especificación ya estaban presentes; lo único que se requería era reemplazar la señal ambiental por otra de origen celular. Esto podría conseguirse mediante una diferenciación local del citoplasma del huevo que pudiera definir células germinales, un fenómeno común en los animales actuales.

Otros cambios evolutivos posteriores que implicarían duplicación de genes podrían originar nuevos tipos celulares y los mecanismos de generación del patrón segmentado. Los mecanismos para establecer las identidades posicionales mediante cajas ho-

meóticas habrían evolucionado pronto, y la combinación de todos estos procesos proporcionaría un medio potente para generar una gran variedad de organismos pluricelulares.

Gastrulación

La especificación del plan corporal implica la generación de un patrón espacial, pero el desarrollo también implica cambios importantes en la forma del embrión, el más espectacular de los cuales es la gastrulación. Durante este proceso, las células superficiales del embrión se mueven hacia el interior. Este desplazamiento es necesario porque las células del mesodermo y del endodermo (que originarán el esqueleto y el intestino) se especifican inicialmente en una capa externa del embrión. Este tipo de movimiento es bastante complejo, y la mejor manera de visualizarlo es representar el embrión primitivo como un globo esférico. Si se coloca el dedo en el punto que correspondería al ano y se empuja hasta perforar el otro extremo, se define el lugar de la boca, y el tubo resultante corresponde al intestino. La gastrulación tiene lugar en la mayoría de animales, y su persistencia evolutiva quizá se deba a que es mucho más sencillo estructurar tejidos en un espacio bidimensional (como la superficie de una esfera) y crear después una tercera dimensión extendiendo el crecimiento de la capa hacia el interior. Estos cambios de forma siempre requieren fuerzas generadas por ciertas células cuya disposición depende de la generación de un patrón espacial previo.

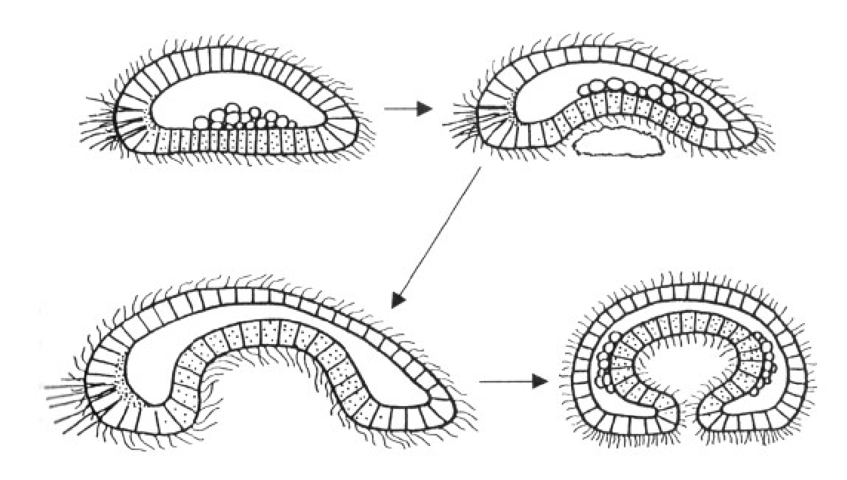


Figura 8. Un origen hipotético de la gastrulación. *Blastaea* forma un intestino primitivo para capturar mejor los organismos de los que se nutre. Esto se parece a la gastrulación que da lugar al intestino en los erizos de mar.

La evolución de la gastrulación hizo posible obtener embriones complejos con dos y hasta tres capas celulares. El biólogo decimonónico alemán Ernst Haeckel sugirió que la gastrulación se originó en un organismo primitivo, al que llamó *Gastraea*. Haeckel conjeturó que sus predecesores, los *Blastaea*, se establecieron en el fondo marino. Un pequeño plegamiento hacia dentro habría constituido una ventaja selectiva si hubiera permitido al *Blastaea* recoger e ingerir alimento de forma más eficaz (figura 8). Esta invaginación habría aumentado de tamaño y se habría convertido en un sistema digestivo primitivo. Tan sólo faltaba que el extremo de la invaginación se uniera a la capa del otro extremo (como sucede en los erizos de mar) para obtener un verdadero intestino. Es posible que el repliegue de las células originara el mesodermo. Es de destacar la cantidad de animales actuales, como el erizo de mar, cuya gastrulación se aproxima mucho a este proceso primitivo hipotético.

¿Qué presiones selectivas se ejercen sobre el embrión en desarrollo? En comparación con el organismo adulto o la larva, el embrión es un ser bastante privilegiado. No tiene que buscar co-

mida o pareja y, en consecuencia, no entra en la competencia por el nicho ecológico. Su función primordial es desarrollarse de manera fiable, y esta fiabilidad es la principal propiedad objeto de selección. Esto no excluye en absoluto la selección de aspectos del desarrollo relacionados con la reproducción y los ciclos vitales, como son la cantidad de vitelo presente, la velocidad del desarrollo y la evolución de formas larvales.

Si la presión selectiva principal recae sobre la fiabilidad del desarrollo, entonces es posible que las variaciones que no afecten a este concepto no sean objeto de selección negativa. Así, la expresión de genes en células equivocadas, la secreción de moléculas a destiempo o las invaginaciones transitorias podrán mantenerse siempre que no interfieran en el resultado final. No está probado que tales procesos sean demasiado costosos, lo que los haría objeto de selección negativa. En cambio, es asombroso lo que cuesta mantenerse vivo: las bombas de sodio y calcio consumen ellas solas un 25% de la energía disponible, mientras que la síntesis y degradación de proteínas consume otro 50%. Esta ausencia de selección negativa ofrece al embrión la posibilidad de explorar nuevos caminos morfogenéticos. Puesto que su principal condicionante selectivo es la fiabilidad de su desarrollo, los embriones, como los estudiantes universitarios veleidosos, pueden llevar una vida disoluta siempre que, al final, aprueben los «exámenes».

Consideremos, por ejemplo, los *Blastaea* o *Gastrea* primitivos antes de la evolución del endodermo. Imaginemos que un reducido número de células se desplaza hacia dentro debido a una mutación aleatoria. Estas células podrían persistir durante muchas generaciones y podrían diferenciarse de muchas maneras diferentes. Algunas de estas formas serían eliminadas por la selección, mientras que otras podrían generar, por ejemplo, músculos internos. La presión selectiva principal recae sobre el adulto. Las

modificaciones de la señalización molecular y la expresión génica también posibilitan la emergencia de combinaciones útiles.

Otra consecuencia importante de la posición privilegiada del embrión es que hace muy probable que distintas vías morfogenéticas conduzcan a un mismo resultado. No hay una forma de gastrulación que sea «mejor» que otra; es el resultado final lo que importa. De hecho, existen muchas variantes, como en las vías que conducen a los embriones primitivos de dos capas de algunos invertebrados.

Conclusiones

No es difícil imaginar caminos hipotéticos que conduzcan de la célula eucariota a los organismos pluricelulares. También se puede conjeturar cómo se diferenciaron los huevos de las células corporales y cómo evolucionaron los ejes corporales y los patrones espaciales. La evolución de estos procesos habría involucrado inicialmente señales ambientales, que luego se habrían independizado en virtud del efecto Baldwin. La duplicación génica y la segmentación, así como la generación de patrones basada en la identidad posicional y la división celular asimétrica, abrieron vías para la divergencia de nuevas pautas de desarrollo.

A partir de estos mecanismos básicos se generó una gran diversidad de organismos. Es concebible que estos mecanismos morfogenéticos se seleccionaran porque generaban variedad con relativa facilidad. Por ejemplo, un mecanismo basado en la información posicional disocia la generación de diferencias de la manera en que se desarrollan las células. El mismo conjunto de identidades posicionales puede generar multitud de patrones diferentes. Todo ello, junto con la posición evolutivamente privi-

legiada del embrión, pudo facilitar el desarrollo de organismos cada vez más complejos.

BIBLIOGRAFÍA

Akam, M., P. Holland y G. Wray (eds), «The evolution of developmental mechanisms», *Development Supplement* (1994).

Lawrence, P., *The Making of a Fly*, Blackwell, Oxford, 1992.

Maynard Smith, J. y E. Szathmáry, *The Major Transitions in Evolution*, W. H. Freeman/Spektrum, Oxford, New York, Heidelberg, 1995.

Raff, R. A., *The Shape of Life: Genes Development and the Evolution of Animal Form*, University of Chicago Press, Chicago, 1996.

Waddington, C. H., *The Strategy of the Genes*, Alien & Unwin, Londres, 1957.

Wolpert, L., *The Triumph of the Embryo*, Oxford University Press, Oxford, 1992.

La evolución de los gérmenes y las armas de fuego

Jared Diamond

Jared Diamond tiene intereses que abarcan desde la fisiología evolutiva de laboratorio hasta los pájaros de las junglas de Nueva Guinea. Su libro *El tercer chimpancé*, un apasionado relato de la evolución humana, ganó el premio británico Rhone-Poulenc al mejor libro científico de 1992. Ha publicado *Armas, gérmenes y acero*, donde compara el desarrollo de las sociedades humanas de todos los continentes en los últimos 13.000 años. Ha sido elegido miembro de la Academia Nacional de Ciencias, de la Academia de Artes y Ciencias y de la Sociedad Filosófica norteamericana.

Este capítulo se encomienda la humilde tarea de explicar, a grandes rasgos, el desarrollo de la historia universal en los últimos 13.000 años. En él nos preguntaremos por qué la historia siguió cursos tan diferentes en los distintos continentes.

Los euroasiáticos, sobre todo los nativos de Europa y Asia oriental, se han diseminado por todo el mundo. Estas personas y sus descendientes dominan el mundo moderno en términos de poder y riqueza. Otros pueblos, como la mayoría de los africanos, han sobrevivido a la dominación europea y se han independizado, pero siguen rezagados en ambos sentidos. Los aborígenes australianos y los pueblos nativos de América y África austral no sólo han sido desposeídos de sus tierras, sino que han sido diezmados, subyugados y hasta exterminados por los colonos euro-

peos. ¿Por qué la historia se desarrolló de este modo y no al revés? ¿Por qué no fueron los indios americanos, los africanos o los aborígenes australianos los que conquistaron o exterminaron a los pueblos europeos y asiáticos?

Para comenzar a responder a esta pregunta debemos retroceder en el tiempo. En el año 1500 de nuestra era, justo cuando comenzaba la expansión de los europeos por los otros continentes, las tecnologías y organizaciones políticas diferían considerablemente de una parte del globo a otra. La mayor parte de Eurasia y el norte de África estaba ocupada por pueblos e imperios en la edad del hierro, algunos de ellos a las puertas de la industrialización. Dos pueblos nativos de América, los incas y los aztecas, eran imperios en la edad de la piedra o del bronce. La región del África subsahariana estaba dividida en pequeños estados o jefaturas indígenas en la edad del hierro. Todos los pueblos de Australia, Nueva Guinea y las islas del Pacífico, así como muchos pueblos de América y del África subsahariana, vivían como agricultores neolíticos o como cazadores-recolectores.

Salta a la vista que las diferencias existentes en el año 1500 fueron la causa directa de las desigualdades del mundo moderno. Los imperios de la edad del hierro conquistaron o exterminaron a las tribus de la edad de piedra. Ahora, ¿cómo se llegó a la situación del mundo en el año 1500?

Para responder a esta pregunta debemos retroceder aún más en el tiempo, con el apoyo de la historia escrita y los descubrimientos arqueológicos. Hasta finales de la última glaciación, hacia el año 11.000 antes de nuestra era, los seres humanos de todos los continentes seguían viviendo como cazadores-recolectores. Las desigualdades existentes en el año 1500 fueron consecuencia de las distintas velocidades de desarrollo económico en los distintos continentes. Mientras que los aborígenes australia-

nos y los nativos americanos siguieron siendo cazadores-recolectores de la edad de piedra, la mayor parte de los pueblos euroasiáticos y muchos pueblos americanos y del África subsahariana desarrollaron paulatinamente la agricultura, el pastoreo, la metalurgia y organizaciones políticas complejas. En algunas partes de Eurasia y de América también se inventaron escrituras propias. Pero todos estos avances surgieron en Eurasia antes que en ninguna otra parte. Así, la producción de herramientas de cobre a gran escala empezó a difundirse por los Andes sólo unos pocos siglos antes del año 1500, cinco milenios más tarde que en Eurasia. La tecnología lítica de los aborígenes de Tasmania en el año 1500 era más simple que la del paleolítico superior europeo, varias decenas de miles de años más antigua.

Así pues, podemos reformular la cuestión del origen de las desigualdades del mundo moderno de la siguiente manera: ¿por qué el desarrollo humano no avanzó a la misma velocidad en los distintos continentes durante los últimos 13.000 años? Esta disparidad de velocidades constituye la pauta más general de la historia y es el tema de este capítulo.

Para apreciar la dificultad de responder a esta pregunta, imaginemos que un historiador alienígena hubiera visitado la Tierra hace unos 50.000 años. Si le hubiéramos preguntado qué pueblos de qué continentes iban a experimentar un desarrollo tecnológico más rápido, qué pueblos serían los conquistadores y cuáles los conquistados, ¿qué habría pronosticado? Quizás habría respondido que serían los africanos, porque la historia humana en aquel continente había empezado seis millones de años antes que en el resto. También podría haber predicho que serían los australianos, pues es en aquel continente donde se encuentran las muestras más antiguas de seres humanos completamente modernos en cuanto a anatomía y comportamiento, así como la prueba

más antigua con diferencia del uso de embarcaciones. Seguramente el visitante habría descartado Europa, que por aquel entonces aún no había sido colonizada por nuestra especie. Para un tal visitante, el estado del mundo 50.000 años después sería una sorpresa. ¿Cómo se produjo este resultado imprevisible?

Ni progreso ni CI

Al llegar a este punto, algunos lectores pueden pensar: ¿será este capítulo una exaltación del progreso? ¿Será una justificación del *status quo* actual, con todas sus intolerables injusticias? ¿Será una apología del racismo? Así pues, tengo que dejar claras un par de cosas desde el principio.

En primer lugar, no afirmo que el desarrollo político y económico sea un bien absoluto para la especie humana. Se puede discutir si la mayoría de la gente es hoy más feliz o tiene mejor salud que la mayoría de los cazadores-recolectores de la antigüedad. No puede negarse que ahora corremos mayores riesgos de autodestrucción que hace 13.000 años. Sólo pretendo analizar el desarrollo del poder económico y político, sin pronunciarme sobre si esta evolución ha sido buena para la mayoría.

En segundo lugar, quiero dejar claro que este capítulo no trata de diferencias de CI (coeficiente de inteligencia) ni pretende revindicar la superioridad de los europeos sobre otros pueblos. Muchos europeos dan por sentada esta superioridad de forma tácita, aunque ya no sea políticamente correcto expresarlo en público. La idea de que los pueblos primitivos en su tecnología también lo son en su biología está muy extendida. Un ejemplo supuestamente convincente es que los aborígenes de Australia y Nueva Guinea permanecieran como cazadores-recolectores ágrafos durante 50.000 años en un continente en el que los euro-

peos construyeron un estado moderno alfabetizado y productor de alimentos a escala industrial apenas cien años después de su llegada. ¿Acaso no prueba esto que los europeos son superiores a los aborígenes australianos?

Desde luego que no. Los australianos de origen europeo no desarrollaron su alfabetización, su producción de alimentos y su forma de gobierno in situ, sino que los importaron de fuera. Muchos psicólogos, sobre todo estadounidenses, han intentado sin éxito reportar diferencias de CI entre grupos humanos diferentes. Mi percepción personal, tras treinta años de trabajo en Nueva Guinea, es que los papúes me parecen bastante más inteligentes, por término medio, que los europeos. Pensándolo bien, esto no es tan sorprendente. La selección natural de la inteligencia opera de forma más despiadada en las sociedades tradicionales neoguineanas que en las europeas, que están organizadas políticamente. Así, es probable que los papúes tengan, en promedio, una cierta superioridad genética sobre los europeos. Además, la mayor parte de los niños europeos dedica demasiado tiempo a entretenimientos pasivos como la radio, la televisión o el cine, mientras que los niños de la Nueva Guinea tradicional pasan su tiempo hablando o envueltos en otras actividades sociales con otros niños y adultos. Todos los estudios psicológicos coinciden en la importancia de la estimulación temprana para el desarrollo intelectual, y en la atrofia mental irreversible que resulta de una estimulación pobre durante la infancia. Las mismas consideraciones pueden aplicarse a cualquier otra comparación entre pueblos industrializados y pueblos tecnológicamente primitivos.

Así pues, tenemos que descartar los prejuicios racistas habituales. En vez de preguntamos cómo se gestó la superior inteligencia de los europeos, tenemos que averiguar por qué los pueblos de la edad de piedra contemporáneos fueron superados y

conquistados por los europeos a pesar de su probable superioridad genética.

La explicación de estas pautas históricas tan generales, que involucran continentes enteros y abarcan miles de años, no puede basarse en la presencia accidental de talentos individuales, como que Alejandro Magno naciera en Macedonia y no en el actual Mississippi. Como veremos, la explicación de las pautas generales de la historia no tiene que ver con diferencias entre los pueblos mismos, sino con las diferencias entre sus entornos biológicos y geográficos.

Europa y el Nuevo Mundo: factores inmediatos

En nuestra primera comparación entre continentes, consideraré el choque entre el Nuevo y el Viejo Mundo a raíz del viaje de Colón en 1492, ya que los factores que determinaron el resultado son bien conocidos. Luego ofreceré un breve resumen de la historia de América, Europa y Asia en lo que se refiere a la evolución de las enfermedades infecciosas y la domesticación de animales y plantas.

Estamos familiarizados con historias como la destrucción del imperio azteca a manos de unos pocos cientos de españoles capitaneados por Hernán Cortés y la conquista del imperio inca por otro escaso contingente de españoles a las órdenes de Francisco Pizarro. Las poblaciones de ambos imperios se contaban por millones o quizá decenas de millones de personas. Cuando Pizarro entró en la ciudad inca de Cajamarca, hoy Perú, y apresó al emperador inca Atahualpa en 1532, su ejército se reducía a 62 coraceros y 106 infantes, mientras que Atahualpa lideraba un ejército de unos 40.000 soldados.

También conocemos los detalles, a menudo espantosos, de las conquistas europeas de otras partes del Nuevo Mundo. El resultado fue que los europeos se establecieron y dominaron la mayor parte del Nuevo Mundo, mientras que la población nativa americana decayó drásticamente a partir de 1492. ¿A qué se debió esto? ¿Por qué Moctezuma y Atahualpa no condujeron a los aztecas y los incas a la conquista de Europa?

Las razones *inmediatas* son obvias. Los invasores europeos teníian espadas de acero y armas de fuego, mientras que los nativos americanos sólo tenían armas de madera y piedra. Tal como sucedió en otras partes del mundo, los caballos dieron a los invasores españoles una gran ventaja en su lucha contra los incas y los aztecas. Los caballos habían tenido un papel decisivo en la historia militar desde su domesticación en lo que hoy es Ucrania hacia el año 4000 a. C.: revolucionaron la guerra en el Mediterráneo oriental después del 2000 a. C., permitieron que los hunos aterrorizaran Europa en el siglo V y proporcionaron la base militar para el establecimiento de reinos en África occidental hacia el año 1000 d. C. Desde la prehistoria hasta la primera guerra mundial, la velocidad de ataque y retirada que permitían los caballos, sus cargas y la superioridad en altura que proporcionaban durante la lucha dejaban a los soldados de infantería prácticamente indefensos en campo abierto. La ventaja militar de la caballería, las armas de acero y las armas de fuego permitió que unas pocas docenas de españoles a caballo derrotaran a ejércitos de miles de nativos una y otra vez.

No obstante, éstos no fueron los únicos factores inmediatos en la conquista europea del Nuevo Mundo. El número de indios muertos en batalla por las espadas y las armas de fuego fue superado con creces por el de los muertos en su propia casa a causa de enfermedades infecciosas como la viruela y el sarampión. Estas

enfermedades eran endémicas de Europa, por lo que los europeos habían tenido tiempo de adquirir resistencia genética e inmunitaria contra ellas, una resistencia de la que carecían los indios. Las enfermedades introducidas por los europeos se propagaron de una tribu a otra, adelantándose con mucho a la llegada de los europeos mismos. Se estima que las enfermedades mataron a un 95% de la población indígena del Nuevo Mundo.

El papel interpretado por las enfermedades infecciosas en el Nuevo Mundo se repitió en otras partes del planeta. Así, las enfermedades infecciosas diezmaron a los aborígenes australianos, los pueblos khoisánidos del África austral y los habitantes de muchas islas del Pacífico. En algunos casos fue al revés: las enfermedades infecciosas endémicas del África tropical, el sudeste asiático y Nueva Guinea fueron los mayores obstáculos para la colonización europea de estas áreas.

Nos queda un último conjunto de factores inmediatos. ¿Por qué Pizarro y Cortés llegaron al Nuevo Mundo antes de que los conquistadores incas y aztecas llegaran a Europa? Esto dependía en primer lugar de la disponibilidad de barcos capaces de cruzar el océano. Los europeos tenían estos barcos. Su organización política permitió que España y otros países europeos financiaran, construyeran, dotaran y pertrecharan sus flotas. También hay que destacar el papel de la escritura, que facilitó la distribución rápida de informaciones detalladas y precisas, como mapas, instrucciones de navegación e informes motivadores de exploraciones ulteriores. La escritura también pudo tener un papel determinante en lo que hoy nos parecen dos grandes ingenuidades: que Atahualpa se dejara engañar por Pizarro y que Moctezuma tomara a Cortés por la reencarnación de un dios. Los incas no tenían escritura y la tradición escrita de los aztecas era corta, por lo que no habían podido heredar el conocimiento de miles de años

de historia escrita. Esto pudo hacer que fueran menos capaces de anticipar una amplia gama de comportamientos humanos y trucos sucios que Pizarro y Cortés no dudaron en emplear.

Europa y el Nuevo Mundo: factores últimos

Hasta ahora hemos identificado los factores inmediatos implicados en la colonización europea del Nuevo Mundo: los barcos, la organización política y la escritura, los gérmenes que mataron a la mayoría de indios antes de llegar al campo de batalla, y las espadas de acero, las armas de fuego y los caballos que otorgaron la supremacía militar a los europeos. En lo que sigue intentaré prolongar esta cadena de causación. ¿Por qué era el Viejo Mundo el que disponía de todas esas ventajas inmediatas y no el Nuevo Mundo? En teoría, los nativos americanos podrían haber sido los primeros en desarrollar espadas de acero y armas de fuego, fletar barcos capaces de cruzar el océano, establecer imperios, montar sobre animales más aterradores que los caballos y ser portadores de gérmenes peores que la viruela.

La pregunta de por qué los gérmenes más patógenos venían de Eurasia es fácil de responder. Llama la atención que los indios americanos no provocaran epidemias en los europeos en compensación por el gran número de epidemias devastadoras que recibieron del Viejo Mundo. Este grave desequilibrio puede explicarse por dos razones simples. En primer lugar, la mayoría de nuestras enfermedades epidémicas comunes sólo puede mantenerse en poblaciones humanas densas, concentradas en pueblos y ciudades, y estas aglomeraciones surgieron en el Viejo Mundo mucho antes que en el Nuevo. En segundo lugar, la mayoría de enfermedades epidémicas humanas procede de infecciones similares en animales domésticos. Por ejemplo, el sarampión deriva

de una enfermedad del ganado, la gripe de una enfermedad de los cerdos, la viruela de una enfermedad de las vacas, y la malaria falciparum de una enfermedad de las gallinas. En América había pocos animales domésticos nativos que pudieran transmitir enfermedades a los seres humanos: la llama y la alpaca (variedades de una misma especie ancestral) y los conejillos de indias en los Andes, el pato aliblanco en la Sudamérica tropical, el pavo en México y el perro en todo el continente. En comparación, pensemos en todos los animales domésticos nativos de Eurasia: el caballo, la vaca, la oveja, la cabra, el cerdo y el perro en toda Eurasia; animales domésticos locales como el búfalo de agua y el reno; numerosos mamíferos de pequeño tamaño, como los gatos y los conejos, y numerosas aves, entre las que destacan las gallinas, los gansos y los patos.

Pero alarguemos un poco más esta cadena causal. ¿Por qué había muchos más animales domésticos en Eurasia que en América? América albergaba cerca de un millar de especies nativas de mamíferos salvajes y varios miles de especies nativas de aves. A primera vista, parece que América contaba con abundante materia prima para la domesticación.

En realidad, sólo una fracción muy pequeña de las especies salvajes de mamíferos y aves se ha domesticado con éxito. Para que un animal salvaje pueda domesticarse deben cumplirse muchos prerrequisitos: una dieta que los criadores puedan proporcionar, una velocidad de crecimiento relativamente rápida, la capacidad de reproducirse en cautividad, poca agresividad, una estructura social jerarquizada que implique un comportamiento sumiso hacia los individuos dominantes (y transferible a los dueños humanos) y tolerancia al encierro. Los seres humanos domesticaron todos los mamíferos salvajes grandes susceptibles de domesticación hace miles de años y, a pesar de los esfuerzos de la

ciencia moderna, no ha habido ninguna adición significativa en tiempos recientes.

Eurasia acabó teniendo más animales domésticos en parte porque es la masa de tierra más grande del planeta y disponía de más especies para comenzar. Esta diferencia inicial se incrementó hace 13.000 años, al finalizar la última glaciación. En aquel tiempo se extinguió más del 80% de las especies americanas de grandes mamíferos, probablemente tras la llegada de los primeros indios. Entre las especies extinguidas había varias que, de haber sobrevivido, podrían haber proporcionado animales domésticos, como los caballos y camellos norteamericanos. En consecuencia, los indios de Norteamérica heredaron menos mamíferos salvajes de gran tamaño que los euroasiáticos, con la llama/alpaca como único animal domesticable. La diferencia entre el Viejo y el Nuevo Mundo en cuanto a plantas cultivables era semejante en términos cualitativos, aunque no tan acusada.

Una razón adicional por la que Eurasia albergaba una mayor diversidad de plantas cultivadas y animales domésticos que América es que su eje principal se extiende de este a oeste, mientras que el eje principal de América va de norte a sur (figura 1). El eje este-oeste permitió que las especies domesticadas en una parte de Eurasia pudieran difundirse fácilmente a lo largo de miles de kilómetros sin cambiar de latitud, con el mismo fotoperiodo y el mismo clima a los que estaban adaptadas. En consecuencia, las gallinas y los cítricos domesticados en el sudeste asiático se difundieron rápidamente hacia el oeste hasta llegar a Europa, los caballos domesticados en Ucrania se difundieron rápidamente hacia el este hasta llegar a China, y las ovejas, cabras, vacas, trigo y cebada del Oriente Medio se difundieron rápidamente en ambos sentidos.

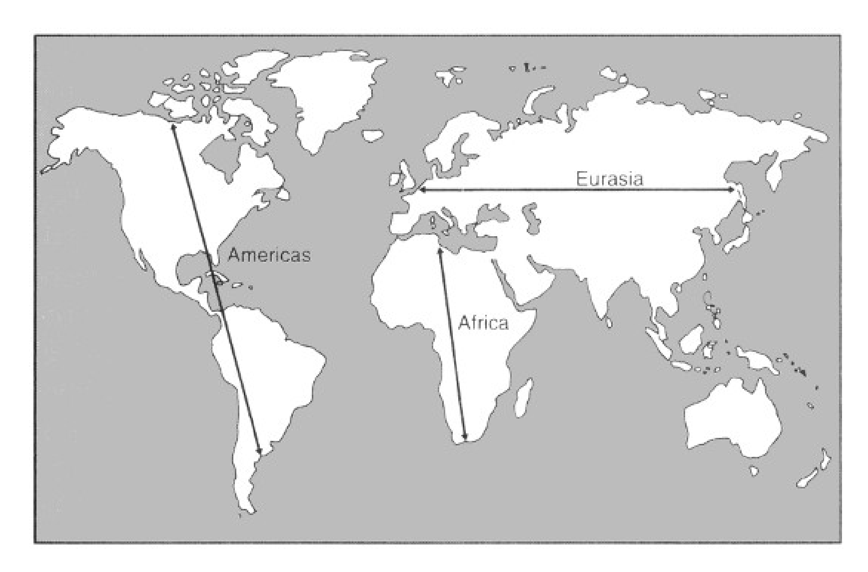


Figura 1. El eje principal de Eurasia va de este a oeste, lo que facilita la difusión del ganado y las migraciones humanas a grandes distancias sin cambios de latitud, fotoperiodo, clima o enfermedades. En América y África el eje principal va de norte a sur, lo que retrasa la migración a grandes distancias por la necesidad de adaptarse a diferentes latitudes, fotoperiodos y enfermedades.

En comparación, el eje norte-sur de América determinó que las especies domesticadas en un área no pudieran difundirse sin encontrarse con fotoperiodos y climas a los que no estaban adaptadas. Por eso el pavo nunca se difundió desde México hasta los Andes y las llamas/alpacas nunca se difundieron desde los Andes hasta México. Las civilizaciones indias de América Central y Norteamérica se desarrollaron sin rebaños de animales, y tuvieron que pasar miles de años antes de que apareciera una variedad de maíz (originario de México) adaptada al clima norteamericano, con una temporada de cultivo más corta y una variación estacional del fotoperiodo más marcada. Esto puede explicar por qué el valle del Mississippi, lo bastante fértil para haber mantenido una sociedad india populosa y políticamente avanzada, no la vio nacer hasta alrededor del año 1000, cuando surgió una variedad de maíz adaptada a las latitudes templadas.

Además de hacer que los europeos incubaran gérmenes patógenos, otra característica importante de los animales domésticos y plantas cultivables de Eurasia es que producen muchas más calorías por hectárea que los hábitats silvestres, cuyas especies son en su mayoría no aptas para el consumo humano. Como resultado, las poblaciones de agricultores y ganaderos suelen ser entre 10 y 100 veces mayores que las de cazadores-recolectores. Esta diferencia numérica explica por sí sola por qué los agricultores y ganaderos de casi cualquier parte del mundo pueden expulsar a los cazadores-recolectores de las tierras adecuadas para la agricultura y el pastoreo. Los animales domésticos también revolucionaron el transporte terrestre y la agricultura al permitir labrar y abonar mucha más tierra. Es más, las sociedades de cazadores-recolectores suelen ser igualitarias y no tienen una organización política más allá de la banda o la tribu; en cambio, los excedentes alimentarios y el almacenamiento que permite la agricultura propician el desarrollo de sociedades estratificadas con elites políticas. Los excedentes alimentarios producidos por los agricultores también aceleran el desarrollo de la tecnología al mantener castas de artesanos que no necesitan cultivar su propia comida y pueden así dedicarse a desarrollar la metalurgia, la escritura, las espadas y las armas de fuego.

Entre los especialistas mantenidos por la agricultura se incluyen los soldados a tiempo completo. Esto proporciona una ventaja militar decisiva a muchos imperios colonizadores. Éste fue, por ejemplo, el factor decisivo para la victoria final de los colonos de Nueva Zelanda sobre las poblaciones indígenas maoríes, que disponían de guerreros fuertes y bien armados. Los maoríes ganaron algunas grandes batallas, pero cada hombre maorí no podía dejar de ocuparse de su huerto durante demasiado tiempo para ir a luchar. Al final los soldados a tiempo completo de los colonos británicos acabaron por desgastar y vencer a los maoríes.

Así pues, hemos empezado identificando una serie de explicaciones inmediatas (armas de fuego, gérmenes, etc.) para la conquista de América a manos de los europeos. Estos factores inmediatos parecen derivarse en última instancia del mayor número de plantas cultivables y animales domesticables del viejo mundo y de su eje principal este-oeste. La cadena causal explica la superioridad directa del Viejo Mundo en cuanto a caballos y gérmenes patógenos. Pero las plantas y animales domesticados implican también su superioridad indirecta en cuanto a armas de fuego, espadas, navegación transoceánica, organización política y escritura, productos todos ellos de las sociedades populosas, sedentarias y estratificadas que surgieron gracias a la agricultura.

La historia de África

Veamos ahora hasta qué punto es aplicable este esquema, deducido de la colisión entre los europeos y los nativos americanos, al panorama de la historia africana. Me centraré en la historia del África subsahariana, porque ha estado mucho más separada del continente eurasiático por la distancia y el clima que el norte de África, cuya historia está estrechamente ligada a la de Eurasia.

El panorama de la historia del África subsahariana plantea dos grandes enigmas. En primer lugar, si antes nos preguntábamos por qué Cortés invadió México antes de que Moctezuma fuera capaz de invadir Europa, ahora podemos preguntamos por qué los países europeos colonizaron el África subsahariana antes de que las naciones subsaharianas fueran capaces de colonizar Europa. Los factores inmediatos fueron los mismos que ya hemos discutido: las armas de fuego, el acero, los barcos, la organización política y la escritura. Los caballos tuvieron un papel secundario

en África, y las enfermedades locales parecen haber jugado en contra de los europeos y no al revés. Podemos volver a preguntarnos por qué las armas y demás factores se desarrollaron en Europa antes que en el África subsahariana. Esta cuestión es particularmente problemática para los estudiosos de la evolución humana, ya que ésta ha transcurrido en África durante muchos más millones de años que en Europa. De hecho, los *Homo sapiens* anatómicamente modernos llegaron a Europa desde África hace sólo 50.000 años. Si el tiempo fuera un factor determinante en la evolución de las sociedades humanas, África tendría que haber disfrutado de una ventaja considerable respecto de Europa.

El segundo enigma en el panorama de la historia africana tiene que ver con los enfrentamientos en el interior del propio continente. Parece ser que la mayor parte del África subecuatorial estuvo ocupada hasta hace unos 2000 años por dos grupos de cazadores-recolectores: los pigmeos en las zonas ecuatoriales húmedas y las poblaciones khoisánidas (bosquimanos y hotentotes) en las partes más secas de África austral. Hace unos 2000 años, las poblaciones bantúes, originarias de la región tropical del oeste africano, se expandieron rápidamente por la práctica totalidad del África austral y reemplazaron a las poblaciones khoisánidas, excepto en la región de El Cabo y otras zonas áridas inadecuadas para la agricultura. Esta expansión bantú a costa de pigmeos y khoisánidos fue posible porque los primeros poseían agricultura, ganado y metales. No obstante, podemos preguntarnos de nuevo por qué estos avances fueron desarrollados por los bantúes y no por los khoisánidos.

Como en el caso americano, estas ventajas son el reflejo de diferencias biogeográfícas en cuanto a la disponibilidad de especies silvestres de plantas y animales. En lo que respecta a los animales, llama la atención que el único animal domesticado del África

subsahariana fuera un ave, la pintada o gallina de Guinea. Todos los mamíferos domésticos africanos (vacas, ovejas, cabras, caballos, incluso perros) se introdujeron en el África subsahariana desde el norte, desde Eurasia. Esto puede sorprender a primera vista, pues África es contemplada hoy como el continente de los mamíferos salvajes grandes *par excellence*. Pero ninguna de estas conocidas especies de animales salvajes grandes era domesticable.

Todas fueron descartadas, ya por su organización social inadecuada, ya por su conducta agresiva, ya por su baja tasa de crecimiento, etc. ¡Imaginemos qué rumbo habría tomado la historia mundial si los rinocerontes e hipopótamos africanos se hubieran dejado domesticar! La caballería clásica no habría podido hacer nada contra una caballería de rinocerontes o hipopótamos. Si estos animales hubieran podido domesticarse, los africanos subsaharianos habrían hecho picadillo a los europeos. Pero la historia tuvo otro curso.

Como ya he dicho, la ganadería africana se basó en especies euroasiáticas procedentes del norte. Tal como sucede en América, el eje principal de África va de norte a sur y no de este a oeste. En consecuencia, la difusión hacia el sur de estos animales domésticos fue muy lenta, pues tenían que adaptarse a zonas con distintos climas y diferentes plagas. El ganado vacuno, ovino y caprino alcanzó la frontera norte de la meseta de Serengueti poco después del año 3000 a. C., y tuvieron que pasar 2000 años antes de que cruzara el Serengueti y llegara a los pueblos khoisánidos del África austral, justo antes que los invasores bantúes.

La historia de las plantas africanas cultivables es todavía más interesante. La agricultura basada en plantas silvestres indígenas surgió de forma independiente en África y se expandió desde el ecuador hacia el Sahara. La más conocida de estas plantas africanas es el café, una planta originaria de Etiopía que ahora se culti-

va por todo el mundo. Otras plantas cultivables de la región comprendida entre el Sahara y el ecuador son el sorgo, varias clases de mijo y batatas, y la palmera oleosa. Sin embargo, en las regiones al sur del ecuador no se domesticó ninguna planta silvestre. En consecuencia, los bantúes desarrollaron la agricultura y los khoisánidos no. La agricultura fue llevada al África austral por los invasores bantúes, los cuales desplazaron a la mayoría de pueblos khoisánidos nativos.

Las dificultades para la expansión de especies domesticadas que plantea un eje norte-sur son más relevantes para los cultivos que para el ganado. Recordemos que los cultivos básicos del antiguo Egipto fueron importados del Próximo Oriente y el Mediterráneo, como el trigo y la cebada, que requieren para germinar lluvias invernales y variación estacional del fotoperiodo. Estos cultivos no podían difundirse hacia el sur más allá de Etiopía, donde llueve en verano y la variación estacional del fotoperiodo es escasa o nula. El desarrollo de la agricultura al sur del Sahara tuvo que esperar a que se empezaran a cultivar especies vegetales nativas como el sorgo y el mijo, adaptadas a las lluvias de verano africanas y a un fotoperiodo relativamente constante.

Por la misma razón, los cultivos del África central no pudieron difundirse hacia el sur, hasta la zona de clima mediterráneo del África austral, donde volvía a haber lluvias invernales y variación estacional del fotoperiodo. En este caso, la agricultura en la región de El Cabo requería cultivos del Creciente Fértil y el Mediterráneo, los cuales no podían sobrevivir a las condiciones del África central y, en consecuencia, no podían propagarse por vía terrestre a través de cadenas de agricultores. Estos cultivos no alcanzaron la región hasta la llegada de los colonos europeos en el siglo XVII. El avance bantú hacia el sur se detuvo en Natal, región a partir de la cual empezaban las lluvias invernales y los cul-

tivos bantúes no podían florecer. Esta adaptación limitada de los cultivos tuvo consecuencias importantes para la política sudafricana moderna, debido a que los agricultores bantúes no ocupaban la región de El Cabo cuando llegaron los europeos.

Una consecuencia adicional del eje principal norte-sur africano se relaciona con una característica curiosa de la agricultura en el África tropical moderna. Algunos de los cultivos más importantes de esta región ya no son cultivos originarios de la región, sino plantas tropicales asiáticas como las bananas, las batatas y el taro, o americanas como el maíz o la mandioca. El África tropical está rodeada de océanos por ambos lados, de manera que los cultivos asiáticos no la alcanzaron hasta que los comerciantes árabes e indonesios llegaron a través del océano Índico, hace unos 2000 años. Los cultivos tropicales americanos no llegaron a África hasta que los europeos colonizaron el Nuevo Mundo y exportaron los cultivos de este continente. Si los océanos Índico y Atlántico hubieran estado unidos por tierra igual que en la amplia extensión este/oeste de Eurasia, estos cultivos tropicales asiáticos y americanos tan productivos habrían alcanzado el África tropical miles de años antes, igual que llegaron hasta Europa las gallinas y los cítricos asiáticos.

En resumen, el eje norte-sur y la escasez de especies animales domesticables fueron tan decisivos para la historia africana como para la historia americana. En primer lugar, los pueblos khoisánidos indígenas fueron superados por los pueblos bantúes en la edad del hierro, mucho más numerosos y mejor armados. En segundo lugar, aunque los bantúes tenían algunos cultivos locales en el oeste africano tropical, sólo más tarde adquirieron animales domésticos valiosos procedentes del norte. En consecuencia, la ventaja de los europeos en cuanto a armas de fuego, barcos, or-

ganización política y escritura permitió que éstos colonizaran África antes de que los africanos colonizaran Europa.

La historia de Australia

Concluiremos nuestra vertiginosa vuelta al mundo fijando nuestra atención en el último continente, Australia.

Hasta hace poco, Australia era el único continente habitado exclusivamente por cazadores-recolectores. La Australia original estaba exenta de agricultura, pastoreo, escritura, metalurgia y organización política por encima de la tribu o la banda. En consecuencia, los gérmenes y las armas de fuego europeas destruyeron la sociedad aborigen australiana. Ahora bien, ¿por qué todos los aborígenes australianos continuaron siendo cazadores-recolectores?

Hay tres razones obvias para ello. En primer lugar, hasta ahora ninguna especie animal y sólo una especie vegetal originaria de Australia (la nuez de macadamia) ha podido domesticarse o cultivarse. No hay canguros domésticos.

En segundo lugar, Australia es el continente más pequeño de todos, y la mayor parte de su extensión sólo puede mantener bajas densidades de población humana por la escasez de precipitaciones y la baja productividad de la tierra. Antes de la llegada de los europeos, la población australiana aborigen era de unas 300.000 almas.

Por último, Australia es el continente más aislado. Las únicas relaciones de los aborígenes australianos con el exterior fueron los poco frecuentes contactos marítimos con habitantes de Nueva Guinea e Indonesia. La costa noroeste de Australia, donde de vez en cuando desembarcaban pescadores indonesios, es una de

las zonas más estériles de Australia, nada adecuada para los cultivos que pudieran haber traído los visitantes. En consecuencia, la barrera cultural entre Australia e Indonesia o Nueva Guinea se mantuvo llamativamente abrupta. Así, en Nueva Guinea encontramos arcos y flechas, agricultura, cerdos, gallinas y cerámica desde hace miles de años; sin embargo, ninguno de estos elementos culturales cruzó los cerca de doscientos kilómetros de agua del estrecho de Torres para difundirse por Australia.

Para hacernos una idea de la influencia del aislamiento y la pequeñez de las poblaciones en el ritmo de desarrollo, consideremos el ejemplo de la isla de Tasmania, donde vivió la sociedad humana más insólita del mundo moderno. Tasmania es una isla de unos 67.000 kilómetros cuadrados, a unos 210 kilómetros al sur de Australia y a la misma latitud de Vladivostok o Chicago.[3] Cuando los europeos llegaron por primera vez a Tasmania en 1642, la isla estaba habitada por unos 4000 cazadores-recolectores emparentados con los habitantes del continente australiano, pero cuya tecnología era más simple que la de cualquier otro pueblo de la Tierra. Repasemos algunos elementos culturales de los aborígenes australianos ausentes en los tasmanios. En primer lugar, los tasmanios no sabían encender fuego: si se apagaba el fuego de una familia, ésta tenía que pedir fuego a sus vecinos para reavivarlo. Las únicas armas de los tasmanios eran lanzas de mano y garrotes, y carecían de los bumeranes, propulsores y escudos que se usaban en el continente. Los tasmanios no fabricaban herramientas de hueso ni herramientas de piedra especializadas ni herramientas compuestas (como cabezas de hacha montadas en un mango). Su única herramienta de piedra era un raspador de mano sin pulimentar. Con estos raspadores los tasmanios no podían talar árboles ni ahuecar troncos para construir canoas. Desconocían las agujas de coser, las redes, las trampas o las cuerdas. En consecuencia, se cubrían con simples capas de una pieza.

Sus embarcaciones eran balsas incapaces de mantenerse a flote más allá de veinte kilómetros. Es más, por increíble que parezca si se piensa que los tasmanios se concentraban en las zonas costeras, no comían pescado.

Los antropólogos se sienten un tanto incómodos al hablar de los tasmanios, quizá porque no pueden olvidar el trágico fin de su sociedad: los colonos británicos los exterminaron en unas pocas décadas. Es como si temieran que el reconocimiento de la simpleza tecnológica de los tasmanios pudiera interpretarse como una justificación de su exterminio, lo cual, por supuesto, es una insensatez. Así, algunos antropólogos alegan que los tasmanios tenían una tecnología simple porque no necesitaban más. Esta interpretación es a todas luces incorrecta. Cualquier grupo humano, en cualquier parte del mundo, se beneficiará de saber encender luego, tender trampas y redes, coser prendas de abrigo para los inviernos húmedos y fríos, o manejar mecanismos como el arco o el propulsor para lanzar un proyectil con mucho más impulso del que puede generar el brazo sólo. Seguramente los tasmanios se habrían beneficiado de estos conocimientos, lo mismo que otros pueblos, y su ausencia en la isla de Tasmania es algo que requiere explicación. ¿Cuál es el origen de las carencias de la cultura material tasmania?

Hay que tener presente que Tasmania estuvo unida al sur del continente australiano durante el periodo Pleistoceno, cuando el nivel del mar estaba más bajo. Hace unos 12.000 años, el nivel del mar ascendió y el puente de tierra desapareció bajo las aguas. Los seres humanos habían llegado a pie hasta Tasmania hacía decenas de miles de años, cuando la isla todavía formaba parte de Australia. Pero, tras la desaparición del puente, los tasmanios no volvieron a tener contacto con los aborígenes australianos del continente ni con cualquier otro pueblo hasta que el explorador

holandés Abel Tasman llegó a la isla en el año 1642; ni los tasmanios ni los australianos tenían embarcaciones capaces de cruzar el estrecho de 210 kilómetros que separa Tasmania de Australia. Así pues, la historia de Tasmania es un caso de aislamiento humano sin precedentes fuera de la ciencia ficción, un aislamiento absoluto que duró 12.000 años.

Si todas las técnicas ausentes de Tasmania y presentes en el vecino continente australiano hubieran sido inventadas por los aborígenes australianos en los últimos 12.000 años, podríamos concluir con seguridad que los tasmanios no fueron capaces de inventarlas por su cuenta. Sin embargo, el registro arqueológico evidencia un hecho sorprendente: lo cierto es que los tasmanios *abandonaron* parte de la tecnología que habían traído consigo desde Australia. Así, las herramientas de hueso y las artes de pesca existían en Tasmania antes de que se cortara el puente de tierra, y no desaparecieron del todo hasta el año 1500 a. C. Esto supone una pérdida de tecnologías valiosas: el pescado podría ahumarse y suministrar comida para el invierno, mientras que las agujas de hueso podrían utilizarse para coser prendas de abrigo. ¿Por qué se produjeron estas pérdidas culturales?

A continuación ofreceré la única explicación razonable que se me ocurre. Todas las sociedades humanas pasan por modas pasajeras consistentes en adoptar prácticas poco útiles o abandonar prácticas ventajosas. Por ejemplo, se ha dado el caso de que alguna comunidad de las islas del Pacífico ha decidido por las buenas prohibir la cría de cerdos y exterminarlos, ¡a pesar de que el cerdo es el único mamífero grande disponible como fuente de carne! Pasado un tiempo, los isleños han comprendido que los cerdos eran útiles después de todo y los han importado de nuevo desde otras islas. Cuando surgen tabúes de esta clase en un área en la que hay muchas sociedades humanas en competencia, suele

ocurrir que sólo unas pocas adoptan la prohibición a la vez. Las sociedades que no renuncian a la práctica ventajosa o bien desplazan a las tribus rivales que han adoptado el tabú inútil o bien se convierten en modelo para otras comunidades que se arrepienten de su error y vuelven a la práctica prohibida. Si los tasmanios se hubieran mantenido en contacto con los australianos del continente, seguramente habrían redescubierto el valor de la pesca o la fabricación de útiles de hueso. Pero esto no podía suceder tras el aislamiento de Tasmania, de manera que las pérdidas culturales se hicieron irreversibles.

Si todavía resulta difícil creer que se produjeran estas pérdidas culturales en Tasmania, podemos encontrar ejemplos similares en otros lugares, como en las remotas islas Chathem, al este de Nueva Zelanda, colonizadas por maoríes que vivieron en completo aislamiento durante al menos quinientos años. Hay otras catorce islas del Pacífico muy pequeñas y aisladas cuya población humana local se extinguió tras varios siglos de residencia. La más conocida de estas misteriosas islas es Pitcaim, famosa porque la redescubrieron los amotinados del *Bounty* muchos siglos después de que desapareciera la población autóctona de origen polinesio. Todas estas islas son tan pequeñas que difícilmente podrían haber mantenido más de unos pocos centenares de personas, y ésta es una población demasiado reducida para mantenerse indefinidamente en aislamiento total. Los 4000 tasmanios y los 2000 pobladores de las islas Chatham bastaron para mantener vivas sus sociedades, pero no para protegerlas contra pérdidas culturales importantes.

En resumen, podemos extraer una lección de las diferencias entre las sociedades aborígenes de Tasmania y Australia. Si lo demás no cambia, las innovaciones aumentan y las pérdidas culturales disminuyen en las áreas ocupadas por numerosas sociedades

en competencia mutua, populosas y en contacto con pueblos foráneos. Si esta interpretación es correcta, su alcance podría ser mucho más amplio, pues probablemente explica (junto con la escasez de animales domesticables en Australia) por qué los aborígenes australianos siguieron siendo cazadores-recolectores de la edad de piedra mientras los pueblos de otros continentes adoptaban la agricultura y la metalurgia. También es probable que pueda dar cuenta de las diferencias entre los pueblos eurasiáticos y las sociedades agrícolas de América y el África subsahariana.

Conclusiones y perspectivas

La conclusión general que se desprende de este vertiginoso viaje por la historia humana es que ésta ha sido modelada por el entorno. Creo que la pauta más general de la historia humana (a saber, las diferencias entre las sociedades humanas en los distintos continentes) puede atribuirse a las diferencias medioambientales entre los continentes. En particular, considero que la disponibilidad de especies silvestres de plantas cultivables y animales domesticables, así como la facilidad de propagación de estas especies sin cambios de clima excesivos, han contribuido decisivamente a las diferencias en las tasas de desarrollo de la agricultura y el pastoreo. Estos factores fueron decisivos para el crecimiento de las poblaciones humanas, el aumento de las densidades de población y la disponibilidad de excedentes alimentarios, que a su vez contribuyeron decisivamente al desarrollo de la escritura, la tecnología y la organización política. Es más, las historias de Tasmania y otras sociedades aisladas sugieren que la extensión de la masa continental y el grado de aislamiento, que determinan el número de sociedades en competencia, pueden haber sido factores importantes en la evolución de la humanidad.

Como biólogo que también gusta de trabajar en el laboratorio, soy consciente de que estas interpretaciones pueden ser rechazadas como especulaciones imposibles de probar, pues no se fundamentan en experimentos reproducibles. Pero la misma objeción puede esgrimirse contra cualquiera de las ciencias históricas, como la astronomía, la biología evolutiva, la geología y la paleontología; y, por supuesto, contra la investigación histórica en general. Es por esto por lo que algunos se resisten a adjudicar a la historia la categoría de ciencia: se la clasifica como una ciencia social, es decir, como una disciplina más bien poco científica.

Pero recordemos que la palabra «ciencia» no se deriva del vocablo latino correspondiente a «experimento de laboratorio reproducible», sino del correspondiente a «conocimiento». En la ciencia se busca conocimiento y comprensión mediante cualquier medio disponible y apropiado. Hay muchos campos que nadie vacilaría en considerar científicos aunque los experimentos de laboratorio repetibles sean inmorales, ilegales o imposibles. No podemos manipular las estrellas, no podemos inducir o parar una glaciación, ni experimentar con dinosaurios en evolución. Sin embargo, podemos adquirir un conocimiento profundo en estos campos históricos por otros medios. Deberíamos ser capaces de entender la historia humana, pues la introspección y los registros escritos nos permiten saber más de nuestros antepasados que de los dinosaurios. Así pues, confío en que al final podamos explicar de manera convincente el curso general de la historia humana.

BIBLIOGRAFÍA

Cavalli-Sforza, L. L. y F. Cavalli-Sforza, *The Great Human Diasporas*, Addison-Wesley, Reading (Ma), 1995.

Crosby, A. *Ecological Imperialism: The biological Expansion of Europe, 900-1900*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986. [Trad. esp.: *Imperialismo biológico*, Crítica, Barcelona, 1999.]

Diamond, J. M. *Guns, Germs and Steel*, W. W. Norton, Nueva York, 1997. [Trad. esp.: *Armas, gérmenes y acero*, Debate, Madrid, 1998.]

Zohary, D. y M. Hopf, *Domestication of Plants in the Old World* (2ª edición), Oxford University Press, Oxford, 1993.

La evolución de Londres

Richard Rogers

RICHARD ROGERS estudió en la Architectural Association, con un posgrado en la Universidad de Yale. Fundador del Equipo 4 con Sue Rogers, Norman Foster y Wendy Foster en 1963, se asoció posteriormente con Renzo Piano en 1971; en 1977 fundó la Sociedad Richard Rogers. Ha sido honrado con la Ordre National de la Légion d'Honneur en 1986, nombrado caballero en 1991 y Barón (Lord Rogers de Riverside) en 1996.

Si consideramos que la evolución implica un proceso de cambio acumulativo, las ciudades pueden identificarse con metabolismos que van adaptándose en el tiempo para sobrevivir. En este capítulo argumentaré que Londres, como otros sistemas urbanos complejos, es una estructura frágil y delicada que ha completado un ciclo de cambio evolutivo. La ciudad se enfrenta actualmente a una crisis medioambiental, social y política que amenaza su existencia. Su futuro no puede dejarse en manos de los procesos de mutación aleatoria, en los que las fuerzas del mercado determinan las políticas y dan forma a su entramado físico. Se necesita una planificación inteligente, un diseño que se adelante a los acontecimientos y una intervención gubernamental que evite los procesos de decadencia gradual y extinción final que afectaron a otras culturas urbanas del pasado.

Cuanto más nos percatamos de la importancia de la crisis medioambiental, más importancia adquiere el diseño y la administración de nuestras ciudades (las principales consumidoras de energía y productoras de contaminación del mundo) para la su-

pervivencia de nuestro planeta. La solución pasa por convertir las ciudades como Londres en metabolismos sostenibles capaces de ahorrar recursos, utilizar fuentes de energía renovables y reciclar sus desechos, y proporcionar un medio ambiente social equitativo y estable para las futuras generaciones.

Londres no está sola en la lucha por la supervivencia urbana. La vida humana siempre ha dependido de tres variables: la población, los recursos y el medio ambiente. En la actualidad, somos la primera generación de habitantes humanos del planeta que se enfrenta, *conscientemente*, a los impactos simultáneos del crecimiento demográfico, el agotamiento de los recursos y la degradación del medio ambiente. Todo esto es de dominio público, pero la expansión industrial y el crecimiento urbano continúan. La crisis medioambiental de Londres es tanto más acongojante cuanto es emblemática de la ciudad postindustrial enfrentada a las consecuencias de un crecimiento económico desenfrenado y una explotación desaforada de los recursos naturales y artificiales.

La historia cuenta que las sociedades que no fueron capaces de resolver sus crisis medioambientales tuvieron que emigrar o perecieron. La peculiaridad de nuestra crisis actual es que su escala ya no es regional, sino global: afecta a todo el planeta. Las comunicaciones globales nos traen a domicilio (tanto a los ciudadanos de Ciudad de México y Detroit como a los de Londres) la escala, inmediatez e impacto de la crisis medioambiental. Cada vez está más claro que los mismos factores responsables del deterioro medioambiental están generando una terrible inestabilidad social; los temas sociales y medioambientales están conectados. Ante estas abrumadoras muestras de descomposición, es fácil olvidar que las ciudades, que en la actualidad no consiguen cubrir las necesidades sociales más básicas, pueden proporcionar un medio

ambiente saludable y civilizado a nuestros ciudadanos. Por esta razón, la planificación de nuestras ciudades es más importante hoy que nunca.

Además de ser las principales consumidoras de energía del mundo, las ciudades y las edificaciones son los más codiciosos destructores del ecosistema. En la actualidad, la enorme congestión del tráfico causa en Londres más contaminación atmosférica que la existente antes de la promulgación del Acta para la Limpieza del Aire (Clean Air Act) de 1956, que prohibió la quema de carbón en la ciudad. Se cree que la polución es la responsable de que uno de cada siete niños de las ciudades británicas (y hasta uno de cada diez en algunas ciudades de Europa oriental) sufra de asma. En Estados Unidos, el aumento de la contaminación urbana ha reducido la producción agrícola entre un 5 y un 10 por ciento. Tokio produce unos veinte millones de toneladas de basura al año; ya ha saturado su bahía de desperdicios y ahora se está quedando sin vertederos en tierra firme. Así pues, Londres es una más de las grandes ciudades del mundo en declive. Pero su peculiar historia, su riqueza y sus recursos humanos la colocan en una posición de fuerza para propiciar un cambio radical en la conciencia medioambiental, un cambio basado en el concepto de desarrollo sostenible.

En consideración a la importancia de la crisis medioambiental y su impacto socioeconómico en el equilibrio planetario, las Naciones Unidas han instituido el concepto de «desarrollo sostenible» como fundamento de la política económica mundial (Informe Brundtland, *Nuestro futuro común*, 1987). Se trata de intentar satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la existencia de las generaciones futuras. Este concepto se basa en una nueva concepción de «riqueza», la cual incorpora elementos del medio ambiente que antes se consideraban inagotables y gratui-

tos: un aire limpio, agua dulce, una capa de ozono funcional y una tierra y un mar fértiles. El objetivo final del desarrollo económico sostenible es dejar para las generaciones futuras una reserva de riqueza medioambiental, o capital natural, igual o mayor que la que hemos heredado.

En ningún otro lugar es más importante implementar la «sostenibilidad» que en las ciudades, sobre todo en aquellos países desarrollados que siempre han sido un modelo (bueno o malo) para el tercer mundo. Londres puede proporcionar un nuevo modelo de desarrollo sostenible, convertirse en el faro del diseño urbano moderno. Tal como sucedió en el siglo XIX, en el cénit de la revolución industrial, Londres puede ser el ejemplo a seguir en el desarrollo de las ciudades del futuro.

Una ciudad monofuncional

En lo que respecta a las ciudades, la sostenibilidad tiene que definirse tanto en términos sociales y culturales como económicos. La pobreza, el desempleo, las enfermedades, el fracaso escolar (en resumen, las injusticias sociales) debilitan la capacidad de las ciudades para efectuar estas políticas. En este aspecto, Londres empieza a parecerse al prototipo de ciudad moderna: una ciudad-fortaleza dividida en guetos pobres y ricos, parcelada en zonas monofuncionales (el distrito de los negocios, las urbanizaciones, los barrios residenciales) con enormes edificios de un solo uso, áreas de ocio y centros comerciales que destruyen la sutil textura multifuncional del núcleo tradicional de la ciudad.

El politólogo norteamericano Michael Walzer describe esta diferencia estructural hablando de espacios «monofuncionales» y espacios «multifuncionales». Los primeros están diseñados por planificadores y realizadores con un solo propósito en mente.

Los segundos están destinados a usos diversos, en los que todo el mundo puede participar. Ambos tipos de espacios tienen un papel en la ciudad. Los espacios monofuncionales satisfacen nuestro moderno anhelo por el consumo privado, la autonomía y la intimidad. En cambio, los espacios multifuncionales sirven a la comunidad: reúnen sectores diversos de la sociedad y fomentan la tolerancia, la identidad y el respeto mutuo.

En las ciudades, los espacios multifuncionales están retrocediendo frente a los espacios monofuncionales, y no sólo en Norteamérica. En Londres, los negocios locales y las tiendas han ido desapareciendo gradualmente de las calles principales de Shoreditch, Limehouse o Chiswick, desplazados hacia los centros comerciales o los parques de negocios que rodean las autopistas principales, especialmente la M25. Las comunidades londinenses tradicionales con funciones mixtas están siendo reemplazadas por enclaves estrictamente residenciales, parques industriales y centros comerciales. El departamento de medio ambiente ha admitido recientemente que la política gubernamental de planificación de centros comerciales ha provocado la ruina de los mercados en pueblos y ciudades.

Los pueblos y aldeas de Londres han salido perjudicados. Los pequeños negocios del centro de la ciudad están abrumados por los altos alquileres y contribuciones, la polución y la congestión de las calles. El resultado inevitable es que las calles, plazas y otros espacios públicos están perdiendo su diversidad y la animación que ésta produce. A medida que los espacios públicos entran en decadencia, desaparecen las reglas naturales de las calles y se pierde la sensación de seguridad que emana de la presencia efectiva de la gente. Los espacios públicos se convierten en poco más que áreas funcionales, autopistas para peatones acelerados o automóviles cerrados a cal y canto. A medida que Londres se di-

vide en guetos de actividad, los espacios intermedios pierden su alma. Paseemos por una urbanización de Hoxton, Tower Hamlets o Dalston y sentiremos la intensidad del desarraigo. Los disturbios de Broadwater Farm y Brixton de finales de los ochenta son la consecuencia social de esta degradación urbana y medioambiental. Son síntomas tangibles de la misma enfermedad que ha encendido tres sublevaciones civiles en Los Angeles en las últimas tres décadas, una denuncia abrumadora de la incapacidad para controlar nuestro propio destino en un mundo supuestamente desarrollado. A pesar de su fachada humanista, Londres está en peligro de ir por el mismo camino.

Londres: un metabolismo en evolución

¿Por qué Londres, que todavía es venerada como una de las ciudades más atractivas del mundo occidental, ha llegado a este momento crítico de su evolución? En efecto, la ciudad ha experimentado una serie de periodos de crecimiento coordinado y cambios radicales parecidos a los ciclos evolutivos de los organismos vivos. A partir de un pequeño puesto avanzado del Imperio Romano, Londres creció hasta convertirse en la primera megalópolis de la revolución industrial, la ciudad más superpoblada, contaminada e insalubre del mundo. La Ciudad de las Noches Fatales, «cargada de gases venenosos y pestilentes, [en la que] miles de seres se aborregaban juntos… en podridos y hediondos bloques de casas baratas», según Andrew Mearns (1883), se transformó en una ciudad civilizada gracias a una serie de intervenciones. La fundación del Consejo del Condado de Londres y la adopción de nuevas leyes establecieron los estándares de las aglomeraciones urbanas de todo el mundo. Con parques urbanos, un sistema de viviendas públicas, alcantarillado moderno, alumbra-

do público y un sistema de transporte público efectivo injertado en una ciudad al borde de la explosión, Londres se convirtió en el modelo de la ciudad humanista moderna.

Pero el organismo urbano, alimentado por una economía desenfrenada, continuó creciendo. En las primeras cuatro décadas del siglo XX la población aumentó de cinco a ocho millones de personas. Los problemas de superpoblación e inadecuación inmobiliaria se agravaron tras los severos bombardeos de la segunda guerra mundial. Fue en el punto álgido de la guerra cuando el arquitecto inglés y pionero de la planificación urbana Patrick Abercrombie redactó el Gran Plan de Londres, que iba a reconducir el crecimiento de esta ciudad. El plan consistía en establecer cuatro anillos concéntricos, con el centro de la ciudad en medio y el campo en la periferia. El anillo verde estaba previsto como cordón sanitario para contener la ciudad y proteger la campiña. El crecimiento de la población fue absorbido por una constelación de nuevas ciudades satélites (Harlow, Basildon, Stevenage y Hatfield) unidas por una ruta radial principal que discurría, más o menos, por la zona del cinturón de la M25.

El plan de Abercrombie aseguró la supervivencia de Londres. Además de frenar la desorganización urbana (que habría conducido a kilómetros y kilómetros de suburbios al estilo norteamericano) canalizó el crecimiento y el desarrollo urbanos hacia ciudades estratégicamente situadas. El plan permitió que Londres absorbiera la extraordinaria presión del crecimiento económico y demográfico de los años cincuenta y sesenta, y en cierta medida pudo contener la embestida del automóvil hasta los años setenta.

La decadencia de Londres, 1975-1995

Sin embargo, a partir de los años setenta Londres entró en un nuevo periodo de cambio intensivo, aunque esta vez ha sido una decadencia gradual sin mecanismos de control. De hecho, este declive coincidió con la defunción del plan estratégico, resultado de la enconada destrucción (más que reforma) del Consejo Mayor de Londres a cargo del gobierno central. Ahora mismo, la ciudad más grande de Europa, no tiene una autoridad de planificación estratégica.[4] En vez de eso, sus responsabilidades están repartidas entre cinco ministerios gubernamentales, treinta y tres distritos, la Ciudad de Londres y unos sesenta comités y organismos autónomos de la administración. El Consejo Asesor para la Planificación de Londres, cuya única misión es «asesorar» al gobierno, está aislado en Romford, a unos cincuenta kilómetros de la capital.

La ciudad se está expandiendo en un círculo cada vez más amplio. Cada día vienen a trabajar en ella personas que viven en una zona de 300 kilómetros de ancho, de Cambridge a Southampton, la región más grande y compleja de Europa. Londres se expande y, al mismo tiempo, su centro se vacía. Este modelo de desarrollo crea una ciudad de fuertes contrastes: Londres es una de las siete ciudades más ricas del mundo, pero alberga siete de los diez distritos más deprimidos del país, la mayoría en el sector este del centro. A medida que la ciudad se expande, su centro se pudre. Un *5%* del centro de Londres está en estado de abandono, lo que incluye grandes zonas de Wandsworth, Vauxhall, Greenwich, Shepherd's Bush, Lambeth, Hoxton, Waterloo y King's Cross. Esta cifra no incluye las amplias zonas industriales venidas a menos a lo largo del Támesis, los muelles londinenses que antaño fueron la base de la economía comercial de la ciudad.

Los muelles: una oportunidad perdida o un futuro sostenible

Con el hundimiento del tráfico fluvial y la creación de un puerto de contenedores en Tilbury en los años setenta, el corredor de 24 kilómetros de tierra que se extiende hacia el este desde Londres hasta el mar se convirtió en una gran posibilidad de crecimiento y consolidación de la capital. Es por aquí por donde Gran Bretaña se unirá permanentemente a Europa mediante la red internacional de ferrocarriles. La isla de Dogs, los muelles de Surrey y los Muelles Reales ofrecen grandes oportunidades para crear comunidades dinámicas y sostenibles. Las tierras disponibles, la presencia del agua, las vistas al río y las perspectivas de buenas comunicaciones internacionales son los ingredientes para crear comunidades mixtas y equilibradas.

Sin embargo, la política urbana del gobierno desde principios de los ochenta ha excluido prácticamente cualquier planificación estratégica que fomente las comunidades mixtas. El *lassez faire* y el enfoque mercantilista (lo cual se parece mucho a un proceso de mutación aleatoria) ha producido una ciudad híbrida, desmembrada en zonas de desarrollo comercial caótico, con agrupaciones de oficinas por un lado y viviendas por otro, sin ninguna visión cívica. Con la creación de la Corporación para el Desarrollo de los Muelles de Londres y la Zona Empresarial, el gobierno central intenta granjearse el apoyo de los inversores privados con importantes deducciones de impuestos. En lugar de ganar un nuevo distrito dinámico y humano, unido al armazón de la gran metrópolis, los londinenses han obtenido edificios comerciales indiferenciados, unidos por un tren de «parque de atracciones». El contribuyente perdió dinero y la comunidad se distanció del proceso de toma de decisiones; se le prometió el oro y el moro y sólo ha obtenido edificios grandes y más tráfico.

Si tomamos buena nota de la experiencia de los muelles, podremos crear nuevas posibilidades para el futuro de Londres a

través del crecimiento sostenible. El nuevo enlace ferroviario con Europa es particularmente esperanzador. El impacto que tendrá en esta parte de Londres será enorme. Hace cincuenta años «Heath Row» era un pueblo desconocido, y ahora es el aeropuerto internacional con más tráfico del mundo, un polo de riqueza, empleo y desarrollo para el oeste de Londres. Con previsión y planificación estratégica, la conexión ferroviaria y sus efectos indirectos sobre la urbe podrían producir similares recompensas en el este de la ciudad y en el corredor del Támesis, y estructurar el crecimiento policéntrico alrededor de pueblos y centros sociales ecológica y socialmente sostenibles.

Tráfico, congestión y transporte público

Pero Londres debe resolver unos cuantos problemas fundamentales de infraestructura antes de abordar el desarrollo de zonas específicas y considerar futuros crecimientos. El automóvil, el mayor generador de caos urbano y polución, ha sido el principal embate contra la ciudad a lo largo del siglo XX. Así como el ascensor hizo posible los rascacielos, el automóvil ha permitido que los ciudadanos puedan alejarse de los contaminados centros urbano. El automóvil ha permitido compartimentar nuestras actividades diarias en zonas segregadas de oficinas, tiendas y hogares. A medida que nuestras ciudades crecen, más antieconómico resulta incrementar el transporte público, que cada vez es menos capaz de ofrecer una alternativa adecuada al automóvil.

Lo paradójico del asunto es que el automóvil es seguramente el producto tecnológico más liberador y más deseado del siglo. Es relativamente barato, práctico y promesa de libertad y categoría. Sin embargo, en muchas ciudades del mundo son los propios automóviles los que generan la mayor parte de la contaminación

atmosférica de la que quieren huir los ciudadanos. Entre 1970 y 1995, la cantidad de automóviles privados en Europa se ha más que duplicado, y no sólo continúa aumentando en las ciudades desarrolladas, sino que empieza a crecer en las ciudades en desarrollo.

En Londres, la congestión del tráfico es un tema clave. El miedo al atropello tiene un efecto profundo en nuestro comportamiento. Los padres no dejan que sus hijos pequeños crucen las calles solos, lo cual aísla a los niños de sus amigos y los hace menos independientes. En los últimos 25 años, el número de niños de siete a ocho años que van solos al colegio ha pasado de un 80% a un 9% en todo el país. La preocupación por la seguridad vial hace que los padres de familia se marchen del centro de Londres.

El transporte ocupa una posición central en cualquier estrategia para conseguir ciudades sostenibles. En la actualidad, Londres no tiene una política de transportes concertada. Bien al contrario, su transporte está dominado por los automóviles privados, que contaminan la metrópolis y socavan sus comunidades. Un turbador 66% por ciento de los desplazamientos por el interior de Londres se realiza en automóvil. Es más, el gobierno predice que el tráfico de vehículos aumentará un 142% en los próximos veinte años. Pero, mientras que en 1994 se gastaron 3000 millones de libras de los contribuyentes británicos en carreteras, la mejora del transporte público se ha obviado. Si comparamos la edición actual del mapa del metro de Londres con la de 1930, veremos que el trazado apenas ha cambiado.

Pero el gobierno se muestra poco resuelto incluso cuando acepta que el tráfico rodado es la causa principal de la contaminación del aire en Gran Bretaña. La contaminación atmosférica es en parte responsable de que uno de cada siete niños londinen-

ses sufra de asma o enfermedades respiratorias más severas. Se estima que la contaminación récord del invierno de 1994 causó 155 muertes en sólo cuatro días. Por si esto fuera poco, la Confederación de la Industria Británica estima que, en 1989, la congestión del tráfico costó a la ciudad unos 10.000 millones de libras en tiempo y energía desperdiciados.

La tarifa promedio de autobuses, trenes y metro en Londres es casi dos veces más cara que en París y cinco veces más cara que en Madrid. Exceptuando la extensión de la Jubilee Line, la construcción de líneas nuevas de ferrocarril y metro, como las de Chelsea-Hackney o Crossrail, se retrasa o simplemente se abandona.

Otras ciudades están resolviendo sus problemas de congestión y contaminación con mucha más determinación, visión y coraje. Londres necesita de políticas para reducir la polución y la congestión del tráfico y para mejorar el transporte público. Habría que ofrecer incentivos fiscales a quienes compren automóviles de pequeña cilindrada y con catalizadores o, mejor aún, eléctricos. También habría que implementar un sistema de peajes para disuadir el tráfico de paso. Las investigaciones predicen que el tráfico a través de la ciudad se reduciría en un 30% si se introdujeran peajes hoy mismo.

Pero estas políticas irían en detrimento de la movilidad de los que tienen menos recursos, a menos que se mejorara el transporte público y se hiciera más asequible. Londres necesita una estrategia coordinada de transporte que haya sido evaluada en términos económicos, ecológicos y sociales. En la actualidad, el automóvil es barato porque está respaldado por los contribuyentes. Los costes externos (construcción y mantenimiento de carreteras, subsidios a la industria automovilística, polución, corrosión de los edificios —que ya cuesta nada menos que el 3% del PIB

—, trastornos de las comunidades locales y efectos nocivos sobre la salud) simplemente no se reflejan en el coste del automóvil, el impuesto de circulación o el precio de la gasolina.

Se argumenta que la inversión en transporte público es antieconómica. Pero muchos economistas, de todas las tendencias políticas, rechazan esta idea y reconocen que la sociedad debe distinguir entre la contabilidad a corto plazo y las inversiones a largo plazo. Londres, más que cualquier otra ciudad del mundo, está recogiendo aún los beneficios de las inversiones (privadas) que se hicieron en las redes de metro, trenes y autobuses hace más de un siglo. Las inversiones en un sistema de transporte público decente, limpio y eficiente beneficiarán a la ciudad durante muchas décadas, quizá siglos. Su coste debe evaluarse a largo plazo, en el contexto de las mejoras generales en el conjunto de la ciudad. Un buen transporte público hace que Londres sea más competitiva, ahorra energía y mejora la movilidad y salud de los londinenses, además de embellecer la ciudad.

Espacios públicos y rotondas

El automóvil no sólo ha alterado el estilo de vida, la economía y el medio ambiente de Londres, sino que también ha tenido un efecto negativo en su infraestructura física y ha contribuido sustancialmente a la erosión de la vida pública. Los grandes espacios públicos de Londres (Parlament Square, Picadilly Circus, Trafalgar Square) y plazas como Horse Guard's Parade, Somerset House y Burlington House han sido aplastados por los automóviles; y esta situación es todavía peor en el centro de barrios como Hammersmith, Shepherd's Bush, Brixton o Dalston. La sustitución del transporte privado por el público proporcionaría a

los londinenses la oportunidad de cambiar autovías por espacios públicos.

Trafalgar Square, antaño el corazón del imperio, es ahora una rotonda. Los turistas se sienten decepcionados; los londinenses la ignoran. Pero la plaza podría transformarse fácilmente convirtiendo la calle que la separa de la National Gallery en una zona comercial. Una nueva desviación en la parte superior de Whitehall permitiría esta transformación. Tal como sucede en el Campo de Siena o en la plaza Beaubourg en París, Trafalgar Square se convertiría en un lugar de encuentro dinámico, desde donde se podría disfrutar de sobresalientes perspectivas de las torrecillas, cúpulas y torres de Whitehall y del palacio de Westminster.

Parliament Square podría recuperar su categoría si se conectara con la abadía de Westminster. Shepherd's Bush podría forjar un vínculo con la comunidad circundante. Estos espacios podrían convertirse en plazas cívicas, salones al aire libre para los ciudadanos de Londres.

A gran escala, el mismo concepto de conexión urbana podría aplicarse a la red de parques locales y zonas verdes de la ciudad. Estas canteras de servicios públicos podrían enlazarse fácilmente entre sí mediante calles tranquilas. Donde no hubiera enlaces podrían utilizarse los caminos de sirga y los canales; podrían ajardinarse las vías de tren abandonadas o atenuar el tráfico peatonal izando rutas y lugares específicos. No sería difícil, por ejemplo, crear carriles-bici continuos desde Richmond Park o Clapham Common (con nuevos puentes para peatones) hasta Hampstead Heath y más allá.

El Támesis, un recurso infrautilizado

Pero el verdadero corazón de Londres es el río, que domina la ciudad en todas las imágenes de satélite. En la actualidad, el río separa el sur pobre de Londres del norte más próspero (figura 1). Esta vía de agua enorme y hermosa es la clave para la revitalización de la metrópoli. Puede actuar como un elemento cohesivo único para comunidades diversas y segregadas. Un sistema de transporte fluvial efectivo convertiría al Támesis en una pasarela para alcanzar cualquier punto de Londres. Los paseos marítimos desde Kew hacia Greenwich podrían integrarse en la red de transporte londinense, lo que animaría el corazón de nuevas comunidades con tiendas y servicios, formando la base de una ciudad lineal centrada en el río.

La ribera del Támesis desde el puente de Westminster hasta el Tower Bridge, en el mismo centro de la capital de la nación, es un espacio público infrautilizado, que limita con las comunidades más ricas y más pobres de Londres. Esta área debería convertirse en el núcleo de un gran proyecto Millenium, que implicara espacios públicos antes que monumentos nacionales. Las riberas de este tramo del río contienen algunos de nuestros edificios más famosos y algunas de nuestras instituciones culturales más importantes, desde el parlamento hasta la torre de Londres, desde el Tower Bridge hasta el Festival Hall. También se encuentra a menos de medio kilómetro de Covent Garden, St. Paul, Strand, Old Vic y la estación de Waterloo, aunque nunca asociemos estos lugares con el río.

Un nuevo parque a la orilla del Támesis podría ir desde el parlamento hasta Blackfriars, en la ribera norte del río, si se recondujera la colapsada autopista del dique. De esta forma se consolidarían los jardines existentes para crear un parque de casi cinco kilómetros de longitud a lo largo del río, con cafés y restaurantes: el mayor parque londinense del siglo. El parque también po-

dría adentrarse en el río mediante islas flotantes formadas por barcos amarrados, pontones y paseos marítimos entarimados que conectarían los principales monumentos. El centro de Londres tiene sólo un tercio de los puentes que tiene el centro de París. Londres podría ser una ciudad más armónica, con más vías peatonales integradas en el flujo circulatorio natural de la ciudad.



Figura 1. Una perspectiva de Londres junto al Támesis.

Si muchas de estas ideas pueden parecer utópicas o irreales desde el punto de vista económico, deberíamos considerar las extraordinarias posibilidades para el medio ambiente artificial de Londres (en oposición al natural) que ofrecen la lotería nacional y el Fondo del Milenio. La mayor parte de estos fondos se invertirá en edificios públicos como museos, teatros y centros deportivos, lo que fomentará la revitalización de la ciudad y la participación de los ciudadanos en la reactivación de la arquitectura

británica. Pero el espacio entre estas instituciones y edificios, el espacio público londinense, debería beneficiarse de este dinero llovido del cielo. La lotería nacional debería ser una oportunidad única para pensar a lo grande, para abordar los problemas de la ciudad a escala macroscópica, más que iniciativas encomiables pero poco sistemáticas en relación a edificios y áreas urbanas concretas. En mi opinión, es esencial la transformación del viejo Támesis en un elemento básico de la vida pública de Londres, que devuelva la animación al corazón mismo de la ciudad.

Una estrategia urbana compacta

Muchos de estos temas medioambientales son comunes a urbes de todo el mundo. Pero, a diferencia de Londres, ciudades como Barcelona, San Francisco y Rotterdam están emprendiendo acciones positivas para encauzar esta nueva fase de la evolución urbana. Estas ciudades reconocen que la planificación física de las comunidades existentes o nuevas tiene un claro impacto social y medioambiental. Es aquí donde la noción de desarrollo sostenible es más relevante como principio evolutivo. Londres podría construirse sobre su estructura física actual para formar una nueva red de ambientes compactos, densos y diversos que inviertan la tendencia hacia la degradación del centro urbano, la creación de guetos y la extensión de los suburbios.

El cinturón verde de Abercrombie confirmó que la planificación compacta tiene una ventaja fundamental: protege al campo del desarrollo urbano invasivo. La compacidad se incrementa mediante una red de espacios públicos abiertos y parques en el centro urbano. La ciudad compacta crece alrededor de varios centros de actividad social y comercial, en torno a los cuales las comunidades se desarrollan en barrios. La estructura histórica de

pueblos, aldeas y parques de Londres es típica de este modelo policéntrico.

La ventaja de la estrategia compacta es que los barrios, con sus parques y espacios públicos propios, combinan una gran diversidad de actividades privadas con los servicios públicos, lo que genera oportunidades de empleo a una distancia adecuada de la comunidad. Esta proximidad implica menos tiempo de conducción para satisfacer las necesidades cotidianas y hace que los tranvías, los trenes ligeros, los autobuses eléctricos, la bicicleta y los desplazamientos a pie sean más agradables y efectivos. La congestión y la polución causada por los automóviles se reduce, a la vez que aumenta el potencial para los encuentros aleatorios y la animación urbana.

Las redes metropolitanas de transporte público, como el RER de París, que proporcionan viajes rápidos de un extremo a otro de la ciudad y unen los centros de los barrios, deberían fomentarse en Londres, dejando la distribución a corta distancia en manos de redes de transporte locales. Esto reduciría también el impacto del tráfico, que debería ser parsimonioso y controlado, sobre todo alrededor del núcleo público de los barrios. La proximidad (y la descongestión subsiguiente), la existencia de jardines y la explotación de nuevas tecnologías puede mejorar de forma radical la calidad del aire urbano. La concentración de edificios podría contribuir a una distribución y un reciclaje más eficiente de la energía.

El desarrollo sostenible de Londres y otras ciudades podría estimular la creación de sociedades urbanas basadas en la comunidad. Las ciudades están basadas en las personas, en el contacto cara a cara y la expresión de las culturas locales. Ya sea en un clima caliente o frío, en una comunidad pobre o rica, el objetivo a largo plazo del desarrollo sostenible es crear una estructura flexi-

ble para una comunidad dinámica, con un medio ambiente saludable y no contaminante.

El tamaño descomunal de las ciudades internacionales modernas y el poder de la tecnología actual nos han alejado de las prácticas que históricamente han mantenido a las ciudades dentro de su entorno. La construcción de la ciudad contemporánea se realiza a un nivel de complejidad (tanto técnico como humano) y un ritmo tan prodigiosos que ha sido prácticamente imposible coordinar un desarrollo sostenible. La ciudad aún se considera una máquina que hay que explotar, más que una parte de un medio ambiente que debemos cuidar.

No tenemos que empezar de cero para crear un medio ambiente sostenible. Los enfoques sostenibles pueden aplicarse de inmediato a la renovación urbana. Al igual que Londres, la mayoría de las ciudades del mundo desarrollado han sufrido una desindustrialización intensa en las dos últimas décadas, que ha dejado como herencia un gran desempleo y vastas extensiones abandonadas. Gran parte de este espacio (como los muelles de Londres) está en los centros urbanos o muy cerca de ellos, lo que ofrece magníficas posibilidades para un desarrollo sostenible.

Atajar los problemas sociales de nuestras ciudades implica revisar a fondo los valores colectivos. Pero la reciente evolución de las actitudes en relación al medio ambiente ha preparado el terreno. Si el medio ambiente natural está revalorizándose como un recurso indispensable, el medio ambiente artificial también debería valorarse. Los términos con los que los ecologistas describen nuestras relaciones con la naturaleza (la idea de que no somos dueños, sino fideicomisarios, con responsabilidades ante las generaciones futuras) también se aplican a la vida pública ciudadana.

A la luz de estas consideraciones, no tiene sentido convertir los diques fluviales de Londres en autovías cuando podríamos disfrutar mucho más de un parque ribereño. Es posible que la mejor razón para respetar y promocionar la vida pública sea que ésta es muy gratificante. La vida pública fomenta la tolerancia y el sentido de comunidad. No es una coincidencia que en las sociedades racistas o fascistas la ciudad estuviera segregada. Compartir el espacio público nos fuerza a reconocer lo que tenemos en común.

Londres: fundamentos para un desarrollo sostenible

El patrimonio cívico inherente de Londres (una constelación de pueblos y aldeas, desde Hampstead hasta Westminster, de Notting Hill hasta Limehouse) debería servir para consolidar la ciudad alrededor de barrios compactos, diversos y sostenibles. El hecho de que Londres esté formado por un conjunto de pueblos y aldeas distintas significa que cada comunidad se beneficia de su propio carácter, identidad visual, historia y comunidad. En vez de permitir la expansión de Londres y dejar que estas comunidades entren en decadencia, deberíamos reforzar activamente los barrios. Las grandes áreas abandonadas deberían utilizarse para establecer nuevas comunidades mixtas y diversas.

La ciudad sostenible del futuro debe tener muchas facetas. A pesar de sus grandes problemas, Londres tiene el potencial de convertirse en uno de los primeros sistemas urbanos complejos verdaderamente sostenibles, una ciudad compuesta de muchos ingredientes interconectados. En primer lugar, Londres tiene que desarrollar su estructura de ciudad densa y policéntrica, debido a que esta forma de poblamiento protege el campo, concentra las comunidades alrededor de los barrios y minimiza la de-

pendencia del automóvil. En segundo lugar, Londres debe promover el acceso público a las nuevas urbanizaciones, así como su uso mixto, ya que esto maximiza el contacto y la diversidad y estimula la vida pública. En tercer lugar, Londres debería volver a ser un ejemplo de ciudad equitativa, participativa y autogestionada, donde la sanidad y la justicia se distribuyan equitativamente. En cuarto lugar, Londres debería explotar la oportunidad de convertirse en una ciudad ecológica con un metabolismo cíclico, que devuelva al medio ambiente lo mismo que éste le proporciona. En quinto lugar, Londres debería jugar el papel de ciudad abierta, que acoge nuevas ideas y experimentos arquitectónicos. Por último, Londres debería consolidarse como una ciudad bella, donde el arte, la arquitectura y el paisaje eleven el espíritu.

Es alentador que las tendencias económicas actuales apoyen este enfoque estratégico como una opción viable. La era industrial está dejando paso, por lo menos en los países desarrollados, a la era postindustrial de las comunicaciones, de la potencia de cálculo barata, de las autopistas de la información, de la fabricación limpia y robotizada. Todo esto puede transformar el carácter de nuestras ciudades para mejor. El material bruto de esta nueva economía es, como siempre, los ciudadanos y su conocimiento, la creatividad y la iniciativa. El arte y la ciencia serán el fluido vital de un desarrollo basado en el conocimiento y la base de la creación de más riqueza. Las redes de pequeñas compañías se están convirtiendo en la fuerza motriz de la economía del futuro.

Las nuevas tecnologías e industrias multimedia pueden ayudar a superar las barreras entre las zonas urbanas destinadas a viviendas, oficinas y fábricas, de la misma forma que se están disolviendo las distinciones entre casa y oficina, trabajo y ocio, educación y entretenimiento. Esta economía a pequeña escala dará a una

ciudad como Londres una textura más fina y diversa de actividades y barriadas imbricadas que facilitarán la emergencia de una ciudad más verde, dinámica y comunitaria. Pero las nuevas industrias de la comunicación sólo florecerán en el interior de ciudades con una mezcla idónea de servicios educativos, vida pública y liderazgo creativo. Barcelona, Glasgow y Lyon ya han empezado a trabajar para convertirse en centros de esta nueva era de las comunicaciones. Por eso es tan importante que invirtamos en Londres y otras ciudades británicas y las dotemos de los recursos y la independencia que necesitan para recobrar el control de su evolución y su destino.

BIBLIOGRAFÍA

Girardet, H., *The Gaia Atlas of Cities*, Gaia Books, Londres, 1992.

Hall, P., *Cities of Tomorrow*, Blackwells, Oxford, 1992.

Lovelock, J., *Images of Gaia*, Oxford University Press, Oxford, 1988.

Pearce, D., *Blueprint* 77, *Greening of the World Economy*, Earthscan Publications Ltd., Londres, 1991.

Porritt, J. y D. Winner, *The Green History of the World*, Fontana, Londres, 1988.

Porter, R., *London, A Social History*, Harvard University Press, Cambridge, 1995.

Rogers, R., *Cities for a Small Planet*, Faber and Faber, Londres, 1997.

Walzer, M., «Pleasures and costs of urbanity», *Dissent Magazine*, agosto (1986), págs. 470-475.

La evolución de la sociedad

Tim Ingold

Tim Ingold ocupa la cátedra de antropología Max Gluckman en la Universidad de Manchester. Ha efectuado investigaciones etnográficas en Laponia y escrito extensamente sobre cuestiones relativas al medio ambiente, la tecnología y la organización social en el circulo polar ártico, así como sobre la teoría evolutiva en antropología, biología e historia, el papel de los animales en la sociedad humana y asuntos de ecología humana. Es autor de *Evolution and Social Life* (1986) y *The Appropation of Nature* (1986). En la actualidad trabaja sobre los aspectos antropológicos de la tecnología y la percepción del medio ambiente.

Evolución

Hace muchos años asistí a una conferencia sobre evolución por un ilustre genetista. Sosteniendo una piedra en la mano, observó que, si la soltaba, podíamos estar bastante seguros de que la piedra caería al suelo. Estoy seguro de que toda la audiencia estuvo de acuerdo. «Pues bien», dijo luego, «podemos tener la misma certeza de que las especies han evolucionado». Esta seductora analogía me quedó grabada en la mente por tres razones. En primer lugar, las declaraciones de certidumbre parecen un punto de partida poco usual para empezar a hacer ciencia. Al fin y al cabo, si Darwin no hubiera rechazado la convicción de que las especies habían sido creadas por mandato divino, no habríamos tenido

teoría de la evolución. En segundo lugar, recordé una objeción presentada por Canon Kingsley hace más de un siglo contra la idea similar de la inevitabilidad de la evolución de la sociedad. Una piedra que cae, afirmaba Kingsley, no llegará necesariamente al suelo si alguien decide cogerla al vuelo. Lo que quería decir, por supuesto, es que la libertad humana no podía enmarcarse en una ley mecanicista simple. En tercer lugar, la observación me hizo pensar que, de no haber sido por un gran malentendido sobre la historia de su disciplina, producto de la extensión acrítica al reino orgánico de ideas ampliamente aceptadas sobre la evolución social, los biólogos contemporáneos afirmarían que la creencia en la evolución de las especies es profundamente errónea. Permítaseme explicarme.

El verbo «evolucionar» deriva del verbo latino *evolvere*, cuyo significado original es desenrollar o desplegar. Como es bien sabido, Darwin empleó este verbo una sola vez en la primera edición de *El origen de las especies*. Aparece en la última frase del libro, y Darwin lo utiliza con su sentido original para presentar la historia de la vida como una gran procesión de formas que se despliega ante la mirada intemporal del naturalista. Así como la Tierra se ha mantenido girando según una ley gravitatoria fija, escribió Darwin, «han evolucionado y están evolucionando una infinidad de las formas más bellas y maravillosas». Es sólo una imagen metafórica más, una floritura final en un texto repleto de este tipo de imágenes. Cuando tenía que explicar los cambios reales que experimentan las especies mediante su teoría de la variación sometida a la selección natural, Darwin era mucho más preciso. No hablaba de evolución, sino de «descendencia con modificación», significando con ello la generación encadenada de formas conectadas genealógicamente, cada una ligeramente distinta de las inmediatamente anteriores y posteriores. Es más, Darwin tenía buenas razones para evitar el concepto de evolución.

Los biólogos habían usado esta palabra por primera vez en el marco de la teoría de la preformación embrionaria (el homúnculo de Charles Bonnet) y el filósofo social Herbert Spencer acababa de secuestrarla con un sentido totalmente diferente, pero no menos extraño a las premisas fundacionales de la teoría de Darwin.

Spencer conocía, a través de segundas fuentes, el trabajo del embriólogo Karl Ernst Ritter von Baer, quien sostenía que el desarrollo de cualquier organismo consistía en un proceso de diferenciación estructural que conducía, según la interpretación de Spencer, «de una homogeneidad incoherente a una heterogeneidad coherente». En un artículo de 1857, dos años antes de que Darwin publicara su obra revolucionaria, Spencer especulaba que este principio de desarrollo podía regir no sólo la formación de los organismos vivos a partir de sus células, sino la constitución de las sociedades a partir de sus miembros individuales, de las mentes a partir de elementos de conciencia, y del universo entero a partir de los constituyentes básicos de la materia. A este principio lo denominó inicialmente «ley de progreso», pero poco después sustituyó «progreso» por «evolución», basándose en que el primer término tenía una relación demasiado estrecha con las teorías del desarrollo específicamente *humano*. En la perspectiva de Spencer, el progreso de la humanidad era sólo un aspecto del avance general de la vida, que a su vez era parte integral del desarrollo global del cosmos. Posteriormente, tras leer a Darwin, Spencer se convenció de que se había descubierto una confirmación independiente de su ley evolutiva en el campo de la biología. Es más, Spencer siempre consideró el trabajo de Darwin como un mero complemento de su propia filosofía sintética.

Parece ser que a Darwin no le impresionaba demasiado el estilo grandilocuente de la especulación filosófica de Spencer. No

obstante, apremiado por el codescubridor de la selección natural, Alfred Russell Wallace, consintió en adoptar la expresión de Spencer «la supervivencia del más apto» como posible alternativa a «selección natural» en ediciones ulteriores de *El origen de las especies*. Pero no pudo convencerse a sí mismo de que la modificación de las especies por selección natural conllevara necesariamente progreso o avance en un sentido absoluto. Según su teoría, los organismos tienen que adaptarse a cualesquiera condiciones de vida; si hay algún progreso en su diferenciación estructural o su complejidad global, las razones hay que buscarlas en las condiciones particulares, no en el mecanismo general. Darwin no se comprometía con la evolución de la vida tal como la concebía Spencer (es decir, como una fase de un movimiento cósmico que se construye continuamente a sí mismo, a través de sus propiedades de autoorganización dinámica, dando lugar a estructuras siempre nuevas y cada vez más complejas). Su objetivo era mucho más modesto: explicar la modificación interminable, la remodelación y la adaptación de las múltiples soluciones mediante las cuales el hálito de la vida («insuflado originalmente», según decía, «en unas pocas formas o en una sola») había accedido a todos los rincones del mundo habitable. Fue Spencer, no Darwin, quien vio la mano de la evolución en este proceso de modificación adaptativa; y al hacerlo inició una confusión que han perpetuado generaciones de biólogos, incluso los arquitectos de la «síntesis moderna» como Theodosius Dobzhansky y Julian Huxley.

Es interesante especular qué habría sucedido si no se hubiera producido esta confusión. En vez de la biología evolutiva actual, con sus a veces exageradas pretensiones de poder ofrecer nada menos que una explicación completa de la vida, tendríamos una rama de la biología menos presuntuosa y más específica, que trataría de la mecánica de la adaptación de los organismos. Sus

practicantes habrían seguido los pasos de Darwin y se considerarían investigadores de la descendencia con modificación; siguiendo las tendencias actuales, seguramente se habrían acostumbrado a abreviar la idea con las siglas DCM. Con toda seguridad, la nueva generación de investigadores en DCM habría corregido con vehemencia a cualquier persona lo bastante estúpida para pensar que la modificación adaptativa de las especies es un tipo de evolución. Esto equivaldría, dirían ellos, a confundir el cambio filogenético con el desarrollo ontogénico. Sólo este último, determinado por un programa único codificado en los genes del organismo, puede describirse como un despliegue progresivo de complejidad organizada al que se le puede aplicar con propiedad el concepto de evolución. La descendencia con modificación no se ajusta a ningún programa, sino que se debe a las imperfecciones en la replicación de la información genética de una generación a la siguiente. Esto asegura que no haya dos programas de desarrollo iguales. Si se les planteara la fastidiosa cuestión de si hay evolución en el dominio «superorgánico» (que ahora suele llamarse dominio «sociocultural»), nuestros investigadores en DCM no se pronunciarían. Pero seguramente no manifestarían la intolerancia que muestran sus homólogos reales (es decir, los biólogos evolutivos) hacia los científicos sociales que siguen asociando la idea de evolución con un desarrollo progresivo de la cultura o la sociedad. En vez de censurar a estos científicos sociales por no entender la verdadera naturaleza de la evolución, los investigadores en DCM observarían que los métodos y conceptos del paradigma darwiniano sólo pueden servir para explicar el cambio cultural y social si este último no es un proceso evolutivo.

Sin salir de este escenario, supongamos que se me hubiera pedido un capítulo sobre la evolución de la sociedad. Tanto el lector como yo seguramente esperaríamos, como habrían hecho

nuestros predecesores de hace un siglo, que en él se examinara la afirmación de que la vida social se caracteriza por un proceso irreversible de crecimiento y desarrollo, parecido al que experimentan los organismos. Como estoy convencido de que la vida social forma parte del desarrollo global de la vida orgánica (y que, por lo tanto, no está conducida por un nivel superior de la existencia) habría presentado y propuesto una nueva síntesis sociobiológica. Pero la biología a la que habría recurrido no sería la teoría DCM, sino la rama de la biología del desarrollo que estudia la dinámica de la morfogénesis, el proceso que, trascendiendo la interfaz entre organismo y medio ambiente, genera y mantiene las formas orgánicas. En un artículo publicado en 1991 apunté esta propuesta, y aún sostengo que el enfoque de la biología del desarrollo es más prometedor de entrada para la integración de la biología y las ciencias sociales que la teoría DCM en su actual versión neodarwinista. Pero el problema es más profundo. No se trata sólo de decidir si la evolución social debe equipararse a un proceso de desarrollo ontogenético o de cambio filogenético, sino (lo que es más fundamental) de reconsiderar las premisas de las que se deriva la distinción tradicional entre ontogenia y filogenia. Volveré sobre esta cuestión al final de este capítulo.

En la actualidad, y a diferencia de la situación imaginaria que acabo de presentar, la biología neodarwinista se ha apropiado el término «evolución» y lo define con un proceso de cambio genético mediante variación y selección natural. Como se me ha invitado a escribir sobre la evolución de la sociedad, estoy seguro de que se espera de mí que aborde la cuestión de si la sociedad actual es el producto de un proceso selectivo de alguna clase. No creo que esta afirmación esté justificada. Sin embargo, no pretendo afirmar que necesitamos una teoría diferente para los seres humanos que para el resto del reino animal. Tampoco suscribo la

pretensión de Canon Kingsley de que los seres humanos, al ser conscientes de las leyes de la naturaleza, son libres de transgredirlas a su antojo. Bien al contrario, quiero señalar una paradoja de la biología evolutiva, y es que presupone, sin comprenderlo, el proceso histórico que ha permitido que algunos seres humanos puedan formularlo. Aunque Darwin pudo explicar la selección natural, ¡la selección natural no puede explicar a Darwin! Si queremos comprender cómo encaja la historia humana en la corriente general de la vida orgánica, cosa que creo conveniente, debemos replanteamos nuestra concepción de la evolución. Más adelante sugeriré una manera de hacerlo. Pero antes de continuar debo hacer algunas consideraciones sobre el significado del otro término clave del título. Permítaseme, pues, extenderme un poco sobre la evolución de la palabra «sociedad».

Sociedad

La palabra sociedad deriva del latín *societas*, y aparece por primera vez en el idioma inglés en el siglo XIV.[5] Su significado primario se asociaba al compañerismo, un sentido que retienen las nociones contemporáneas de «sociable» y «sociabilidad», con sus connotaciones de amistad e intimidad. En pocas palabras, «sociedad» denotaba las cualidades positivas de cordialidad, familiaridad y confianza en las relaciones interpersonales directas, las cuales también se encontraban en el concepto de comunidad. De hecho, los términos *societas* y *communitas* fueron prácticamente sinónimos hasta el siglo XVII. Pero a partir del siglo XVIII se produjo un cambio decisivo en el significado de «sociedad», que adquirió un sentido más general y abstracto, más alejado de las relaciones humanas cotidianas. Esta nueva concepción de lo que se llamó «sociedad civil» estuvo ligada inicialmente a un desafío

contra las estructuras de poder establecidas y las divisiones jerárquicas tradicionales del estado absolutista. Así, la idea de sociedad civil se derivó de la *oposición* al poder del estado, del enfrentamiento entre un régimen estrictamente clasista y un asociacionismo igualitario que autorizaba a cada ciudadano a perseguir su propio beneficio estableciendo convenios con otros ciudadanos en interés mutuo. En esta visión liberal y democrática, la sociedad tomaba como modelo el mercado y las relaciones sociales se equiparaban a transacciones comerciales, cuya naturaleza fugaz e interesada implicaba un pacto lábil en vez de un compromiso interpersonal profundo y perdurable. Según este modelo, la sociedad no era más que una suma de transacciones individuales.

Muchos cronistas de los siglos XVIII y XIX lamentaron que la instauración de la sociedad civil acarreara una pérdida del sentido de comunidad. Desaparecieron la confianza, el compañerismo y la familiaridad que, con una visión un tanto romántica, se contemplaban como los rasgos característicos de la sociedad campesina tradicional, sustituidos por los intereses múltiples, antagónicos y competitivos de la sociedad burguesa. Éste fue el origen de las famosas metáforas de «la lucha por la vida» de Darwin y de «la supervivencia del más apto» de Spencer. Una de las citas clásicas sobre esta oposición entre comunidad y sociedad se encuentra en *Gemeinschaft und Gesellschaft*, un trabajo del sociólogo alemán Ferdinand Tonnies publicado en 1887. *Gemeinschaft* suele traducirse como «comunidad», y *Gellenschaft* como «sociedad» o «asociación». «El hecho esencial de la *Gellenschaft*», escribe Tönnies, «es el acto del intercambio, que se presenta en su forma más pura si se considera que lo realizan individuos extraños, sin nada en común, y que luchan entre sí de una manera esencialmente antagónica e incluso hostil.» Así pues, en la época en que Tonnies escribía estas palabras ya se había producido un cambio

radical en el concepto de sociedad, cuyo sentido original de familiaridad y sociabilidad había derivado en antagonismo mutuo y hostilidad.

He señalado que la idea de sociedad civil como agregado de interacciones entre intereses particulares y en competencia se oponía no sólo a la noción primitiva de *societas* como dominio de sociabilidad, sino también a las convenciones jerárquicas en las que se fundaba la autoridad del estado. No obstante, la distinción entre sociedad y estado, así como la naturaleza de sus relaciones, siguen suscitando la polémica. El problema surge porque la sociedad civil no es factible *sin* el estado. Desde que Thomas Hobbes publicara su *Leviatán* en 1651, todos los politólogos reconocieron que una sociedad basada en la libre persecución del interés privado sólo puede funcionar armoniosamente si se regula de manera que nadie, al perseguir sus intereses, constriña la libertad de otros para hacer lo mismo. Se daba por sentado que la existencia de la sociedad civil dependía del establecimiento de un estado capaz de favorecer el desarrollo armónico de la vida social. Otros teóricos, sin embargo, identificaban la sociedad con las instituciones reguladoras y, por consiguiente, con el estado. Según éstos, las transacciones motivadas por el interés propio eran puramente económicas (como las mercantiles) y, por lo tanto, no eran propiamente sociales. Así, la sociedad tenía los mismos límites que la ley y la moral, y consistía en un marco de reglas y obligaciones apoyadas en última instancia por las sanciones que establecía su autoridad máxima. En este caso, el concepto de sociedad no se construye por oposición a la sociedad o al estado, sino por oposición al *individuo*. Ésta fue la premisa fundamental que estableció Emile Durkheim a finales del siglo XIX en su manifiesto fundador de la nueva ciencia sociológica. Esta idea era también la razón principal de su desacuerdo con Herbert

Spencer. Para Spencer, la sociedad no tiene ningún propósito más elevado que los deseos de los individuos que la constituyen. Durkheim, por el contrario, mantenía que el contacto social entre los individuos no es exclusivamente externo, sino que la interpenetración de las mentes puede generar una conciencia de orden superior (una conciencia colectiva) que restrinja y castigue la búsqueda de la satisfacción de los deseos innatos en nombre del conjunto de la sociedad.

Así pues, la historia reciente de las ideas nos ha legado tres significados diferentes y aparentemente contradictorios del término «sociedad». Estas tres concepciones constituyen el núcleo de una interminable controversia entre filósofos, estadistas y reformadores occidentales acerca del ejercicio correcto de las responsabilidades y los derechos humanos. En esta controversia, el significado concreto de la palabra «sociedad» varía en función de su oposición a las nociones de individuo, comunidad o estado, respectivamente. Si se opone al individuo, el término sociedad denota un dominio externo de regulación que se identifica con el estado mismo o, en las *polis* sin administración central, con instituciones reguladoras comparables cuya función es poner freno a la expresión espontánea de intereses privados en nombre de los ideales públicos de justicia y armonía colectivas. En otros contextos, sobre todo en los nacionalismos emergentes, la sociedad representa el poder del pueblo, de una comunidad real o imaginaria unida por una historia, una lengua o un sentimiento compartidos *contra* las fuerzas impersonales o burocráticas del estado. En tercer lugar, la sociedad puede *oponerse* a la comunidad y connotar un modo de organización de seres racionales ligados por contratos interesados, como sucede en los mercados, en vez de vínculos particularistas como, por ejemplo, el parentesco o la amistad.

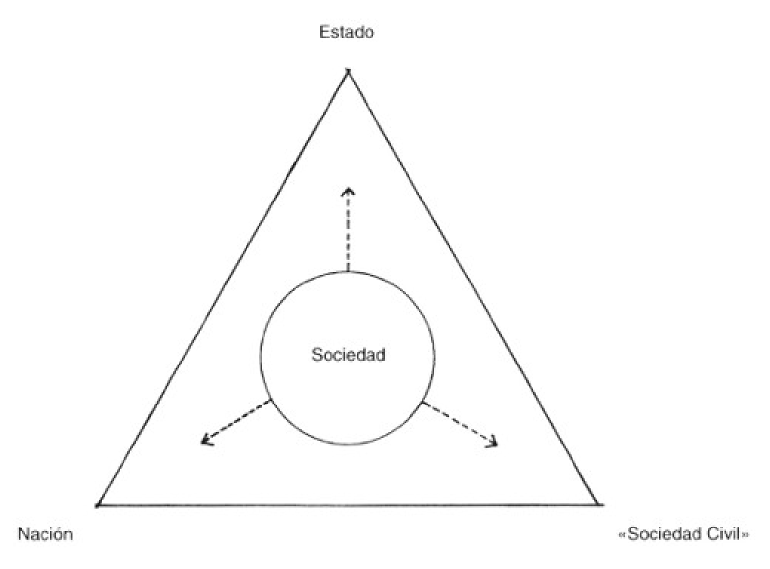


Figura 1. El significado de sociedad puede variar dentro de un espacio semántico definido por las ideas de «sociedad civil», nación y estado.

¿A qué nos referimos entonces cuando hablamos de, digamos, la «sociedad británica»? Quizá queramos significar algo más cercano a una comunidad imaginaria que a una asociación libre de ciudadanos, pero más próximo al gobierno y las instituciones estatales que a la nación, y más cercano a una asociación de ciudadanos libres que al estado. En resumen, el significado de sociedad puede incluirse en un espacio semántico triangular (figura 1) cuyos vértices representan las ideas de sociedad civil, nación (entendida como comunidad) y estado (entendido como autoridad soberana). A partir de esta breve digresión sobre el concepto de sociedad, podemos extraer la conclusión (que he tomado de «Inventing society», un artículo reciente del antropólogo Eric Wolf) de que las afirmaciones sobre la naturaleza y la existencia de la sociedad no son simples enunciados de hechos brutos, sino más bien *reclamaciones* «propuestas y promulgadas para construir un estado de cosas no existente». En otras palabras, el concepto de sociedad no es ni intemporal ni inmutable, ni denota una verdad eterna sobre el estado de la humanidad, como si las socieda-

des fueran cosas que han estado siempre ahí, con independencia de las afirmaciones que puedan hacerse sobre ellas. En vez de eso, como señala Wolf, «el concepto de sociedad tiene una historia, una función histórica dentro de un contexto determinado, en cierta parte del mundo». Personas diferentes, en momentos particulares de la historia y con objetivos políticos concretos, han adoptado el concepto, lo han amoldado a su medida y lo han usado para promover sus reivindicaciones o fundamentar sus causas.

Ahora bien, ¿acaso la historia misma no es un proceso de vida social, que surge de la actividad deliberada de personas que *ya están situadas* en las relaciones y los contextos medioambientales que les han legado sus predecesores? Citando a Karl Marx en *El 18 brumario de Luis Bonaparte*, de 1869, «los hombres construyen su propia historia, pero no la construyen sólo como les place, no la construyen en las circunstancias que ellos escogen, sino en circunstancias que les vienen dadas y heredadas del pasado». Quienes pretenden instaurar un nuevo orden social, sea cual sea su ideología, están por fuerza inmersos en un mundo de otras personas y relaciones, de manera que las formas institucionales creadas por ellos se constituyen dentro del flujo de la vida social. En otras palabras, la realidad de la vida social no está *contenida* en esos sistemas que llamamos sociedades más de lo que la historia lo está en las construcciones de la mente humana. Para comprender esta realidad, Wolf advierte que debemos pensar de manera *relacional*, «en términos de relaciones que se engendran, construyen, expanden y revocan; en términos de intersecciones y solapamientos, y no de entidades sólidas, unidas y homogéneas que perduran sin crítica ni cambio».

Si se adopta esta perspectiva relacional, entonces se aprecia que la vida social puede existir en ausencia de cualquier cosa re-

conocible como sociedad. Para ilustrar este punto describiré a grandes rasgos lo que numerosos estudios han mostrado acerca de la forma de vida de esos que solemos llamar cazadores-recolectores. Una característica de estos grupos humanos es que las personas se relacionan tanto entre sí como con los elementos del entorno no humano sobre la base de una familiaridad y un compañerismo íntimos. Las numerosas observaciones realizadas evidencian que la vida social del cazador-recolector se fundamenta en las relaciones cara a cara. Existe un sentido de la reciprocidad, y la gente se relaciona directamente, sin la mediación de cargos administrativos o jerarquías formales. No obstante, este mutualismo va unido a un gran respeto por la autonomía personal. Se puede actuar esperando que otros actúen en consecuencia, pero no se puede *forzar* su respuesta. Cualquier intento de comprometer la autonomía de acción de otra persona mediante la coacción o el apremio es una traición de la confianza y una negación de la relación. Por eso mismo, la sociabilidad normal se extenderá a cualquiera que demuestre la consideración y la sensibilidad a las necesidades ajenas que constituyen la esencia de la persona. El antropólogo James Woodburn ha observado que, «simplemente, no existe una base para la exclusión». En resumen, el mundo de los cazadores-recolectores no es un mundo socialmente segmentado, porque está basado en relaciones de incorporación y no de exclusión, en virtud de que los otros son «involucrados» y no «clasificados».

Espero haber dejado claro que esta forma de sociabilidad es del todo incompatible con la sociedad entendida como la maraña de intereses entrelazados de la «sociedad civil», o la comunidad imaginaria constituida por la nación o el grupo étnico, o las estructuras reguladoras del estado. En primer lugar, la afirmación de autonomía personal del cazador-recolector se opone frontalmente al individualismo imperante en el discurso occidental so-

bre la sociedad civil. Este último concibe al individuo como un agente racional autocontenido que se constituye de forma independiente y previa a su entrada en el ámbito público de la interacción social. En cambio, la autonomía del cazador-recolector es *relacional*, en el sentido de que su capacidad de actuar por propia es el resultado de una historia de implicación continua con los demás, en contextos de actividad práctica conjunta. En segundo lugar, en un mundo donde la sociabilidad no está constreñida por los límites de la exclusión, la gente no se define a sí misma como «nosotros» en oposición a «ellos», como miembros de un grupo frente a otro, ni tampoco tiene una palabra para describir a su colectividad que no sea el término genérico «personas». De esta manera, los forasteros (exploradores, comerciantes, misioneros o antropólogos) que han buscado nombres para designar lo que perciben como bandas, tribus o sociedades discretas de cazadores-recolectores han acabado por tomar prestados los términos que emplean los pueblos vecinos para insultarlos. En último lugar, el principio de confianza en el que se funda la sociabilidad de los cazadores-recolectores no acepta relaciones de dominación de ninguna clase. Ahora bien, estas relaciones son necesarias para cualquier sistema de instituciones reguladoras que legitime y dé poder a ciertas personas, en nombre de la sociedad, para controlar las acciones de los otros. Así pues, no es suficiente observar, en un discurso antropológico ya anticuado, que los cazadores-recolectores viven en «sociedades sin estado», como si sus vidas sociales carecieran de algo o fueran incompletas en algún sentido, a la espera de perfeccionarse a través del desarrollo evolutivo de un aparato estatal. En vez de eso, el principio de su socialidad, como lo expresó Pierre Castres en el título de su libro de 1974, es fundamentalmente *contrario* al Estado.

Permítaseme volver al problema de la evolución, sin abandonar de momento la antropología de los cazadores y recolectores. Éstos tienen una significación muy especial para los estudiosos modernos de la evolución humana, hasta el punto de que, si no existieran, es casi seguro que habría que haberlos inventado. Al parecer, la teoría evolutiva *necesita* de los cazadores-recolectores. Para mostrar por qué, tengo que invocar una vieja cuestión que ha preocupado a los pensadores occidentales durante siglos sin que, por lo visto, se haya llegado a ninguna solución: la diferencia entre los seres humanos y los otros animales, ¿es esencial o de grado? La idea de que no existe una separación radical entre la especie humana y el resto del reino animal es antigua y se remonta a la doctrina clásica de que todas las criaturas pueden situarse en una sola escala natural o «gran cadena del ser» que conectaría la forma de vida más simple con la más elevada a través de una secuencia ininterrumpida. Cada paso de la cadena sería gradual; como reza el dicho: «La naturaleza no da saltos». Darwin, en su teoría de la evolución por selección natural, reemplazó la imagen de la cadena única por la de un árbol que se ramifica, pero la idea de cambio gradual permaneció. Según la visión de la evolución humana que aparece en los libros de texto modernos, nuestros antepasados se hicieron humanos gradualmente, tras innumerables generaciones. Se cree que una secuencia ininterrumpida de formas enlaza los simios de hace unos cinco millones de años, de los cuales descienden tanto los seres humanos como los chimpancés, a través de los primeros homínidos de hace unos dos millones de años, hasta gente como usted y como yo, seres humanos de una variedad «anatómicamente moderna»: *Homo sapiens sapiens*.

Esto puede estar muy bien para la evolución biológica humana, pero ¿qué sucede con la historia humana? Los estudiosos del siglo XVIII, apegados a la filosofía de la Ilustración, solían entender la historia como el relato del ascenso de la humanidad desde el salvajismo primitivo hasta la ciencia y la civilización modernas. Pero también estaban comprometidos con la doctrina de que todos los seres humanos, en todo tiempo y lugar, compartían un conjunto de capacidades intelectuales básicas y que, en este sentido, podían considerarse iguales. Esta doctrina se conocía como la «unidad psíquica del género humano». Las diferencias en los niveles de civilización se atribuían al *desarrollo* desigual de estas capacidades comunes, lo que equivalía a pensar que los pueblos presuntamente primitivos estaban en una etapa anterior del avance común a toda la humanidad. En resumen, para estos pensadores del siglo XVIII las diferencias anatómicas entre los seres humanos y las otras criaturas eran sólo de *grado*, pero únicamente los seres humanos habían sido dotados de *mente* (es decir, de las facultades del razonamiento, la imaginación y el lenguaje) capaces de experimentar su propio desarrollo histórico en el marco de una forma corporal constante, lo cual nos diferenciaba de manera *esencial* del resto del reino animal. Incluso Linneo, que dio el audaz paso de incluir a los seres humanos en su sistema taxonómico con la denominación *Homo* y fue instado a encontrar un criterio definido que distinguiera anatómicamente a los seres humanos de los antropoides, prefirió expresar la distinción humana mediante un consejo: *nosce te ipsum* (conócete a ti mismo). Sólo los seres humanos, pensaba Linneo, podían desear conocer, a través de sus propios poderes de observación y análisis, qué tipo de seres eran. Entre los animales no hay científicos.

El impacto directo de las ideas de Darwin sobre la evolución humana expuestas en *El origen del hombre* (1871) subvirtió esta

distinción. Las diferencias en la capacidad mental se atribuyeron a distintos grados de desarrollo de un órgano corporal: el cerebro. Así, se suponía que las gentes civilizadas tendrían cerebros mayores y mejor organizados que los de las gentes primitivas, igual que éstas tenían cerebros mayores y mejor organizados que los de los simios. La historia de la humanidad (o, como ahora se decía, la evolución de la sociedad) se entendía como un desarrollo paralelo a la evolución del cerebro, a través de un proceso de selección natural en el que el desventurado salvaje, al que se le asignaba el papel de vencido en la lucha por la existencia, estaba destinado tarde o temprano a la extinción. Cuando Wallace, en sus *Contributions to the Theory of Natural Selection* (1870), sugirió que los cerebros de los salvajes podían ser tan buenos como los de los filósofos europeos y, por lo tanto, tenían capacidades por encima de lo que requerían sus simples condiciones de vida, fue tildado de espiritista chiflado. Se argumentaba que la selección natural sólo dotaría al salvaje del cerebro que necesitara. Sólo a un Creador se le habría ocurrido preparar al salvaje para la civilización por adelantado.

Pero Darwin estaba equivocado y Wallace tenía razón, a pesar de que pocos le creyeron. Los cerebros de los cazadores-recolectores presuntamente primitivos *son* tan buenos y tan capaces de manejar ideas complejas y sofisticadas como los cerebros de los científicos y filósofos occidentales. No obstante, las ideas racistas sobre la superioridad mental innata de los colonizadores europeos sobre los pueblos indígenas persistieron con fuerza en la antropología biológica. En realidad, no fue hasta después de la segunda guerra mundial, y las atrocidades del holocausto, que estos prejuicios dejaron de tolerarse en los círculos científicos. Pero esto planteó un problema a los darwinistas. ¿Cómo podía reconciliarse la doctrina de la continuidad evolutiva con el nuevo compromiso con los derechos humanos? La declaración univer-

sal de los derechos humanos de Naciones Unidas afirmó de nuevo la igualdad fundamental de todos los seres humanos presentes, futuros y, por extensión, pasados. Si todos los seres humanos eran semejantes en cuanto a razonamiento y conciencia moral (en otras palabras, si todos los humanos son seres que, según los preceptos jurídicos occidentales, tienen derechos y responsabilidades) entonces tenían que diferir en esencia de los demás seres. En alguna parte de la línea evolutiva que conduce hasta el ser humano, sus antepasados tuvieron que cruzar el umbral que separa la naturaleza de la humanidad.

Al enfrentarse a este problema, la ciencia moderna sólo tenía un camino: volver al siglo XVIII. De hecho, la mayoría de los evolucionistas contemporáneos parece reproducir de forma enérgica, aun sin pretenderlo, los elementos esenciales de la visión del XVIII. Existe un proceso (la evolución) que conduce desde nuestros antecesores simiescos hasta los seres humanos «anatómicamente» modernos, mientras que otro proceso (la cultura o la historia) conduce desde el pasado primitivo de la humanidad hasta la ciencia y la civilización modernas, sin que se haya producido *ningún cambio biológico*. La historia, según han declarado recientemente los psicólogos David Premack y Ann James Premack, es «una secuencia de cambios en una especie que permanece biológicamente estable» y, de todas las especies del mundo, sólo la humana tiene historia. Tal como se muestra en la figura 2, los ejes de la evolución biológica y la historia de la cultura establecen al superponerse un único punto de origen, sin precedente en la evolución de la vida, en el que se estima que nuestros antepasados cruzaron el umbral de la humanidad y empezó el curso de la historia.

Es interesante observar que, cuando los científicos quieren acentuar la continuidad evolutiva entre los antropoides y los hu-

manos, a éstos se les retrata casi siempre como cazadores-recolectores (o bien se considera que los cazadores-recolectores contemporáneos son fósiles culturales, congelados en el punto de partida de la historia). Un cuadro hipotético que se acepta ampliamente en la actualidad es que las capacidades biológicas que al parecer nos hicieron humanos (el bipedalismo, el uso de herramientas, el cerebro grande, el vínculo de pareja, etc.) evolucionaron en el Pleistoceno como adaptaciones al modo de vida cazador-recolector. En consecuencia, se dice que todos acarreamos, como parte fundamental de nuestra constitución biológica, un conjunto de capacidades y disposiciones adaptadas a los requerimientos de la caza y la recolección en el medio ambiente pleistocénico. Pero lo que era adaptativamente ventajoso para nuestros ancestros pleistocénicos quizá no sea tan adecuado para la vida en un medio ambiente urbano, densamente poblado, donde la gente tiene acceso a tecnologías potentes con un poder de destrucción muy superior al de cualquier objeto concebible por nuestros antepasados. Muchos de los problemas endémicos de la civilización moderna, desde los accidentes de tráfico hasta la guerra mecanizada, se han atribuido a esta asincronía. La idea de que incluso los habitantes de las ciudades modernas están condicionados por este legado de nuestro pasado evolutivo subyace tras el continuado interés, tanto popular como académico, por los cazadores-recolectores contemporáneos, cuya forma de vida se cree más parecida a la de las poblaciones ancestrales, y cuyo mejor conocimiento podría revelarnos algo sobre nuestra naturaleza interior. Se supone que dentro de cada uno de nosotros hay un cazador-recolector que pugna por salir.

En este momento debería quedar claro por qué el pensamiento y la ciencia occidentales, la ciencia de la evolución incluida, necesita de los cazadores y recolectores. En efecto, la categoría «cazador-recolector» nació para caracterizar la condición original

de la humanidad en el punto de intersección de dos procesos de cambio (uno evolutivo, el otro histórico) cuya separación es lógicamente necesaria para sustentar la afirmación de que la ciencia proporciona una explicación autorizada del funcionamiento de la naturaleza aún cuando el científico (que, como el resto de nosotros, es sólo un ser humano) pertenezca a una especie que ha evolucionado hasta su forma actual mediante la selección natural. Se afirma que los humanos no evolucionaron para ser científicos, sino con la *capacidad* de ser científicos y, por lo tanto, de leer y escribir, tocar el piano, conducir automóviles e incluso enviar cohetes a la Luna; con la capacidad para hacer cualquiera de las cosas que los seres humanos han hecho o harán. Si un hombre de Cromagnon de hace unos 30.000 años hubiera nacido en el siglo XX, podría haber sido un Einstein. Su cerebro era tan grande y complejo como el nuestro, pero aún no era tiempo de que este potencial «explotara». Toda la historia humana estaría a caballo entre dos polos, la naturaleza y la razón, entre las figuras paradigmáticas y antagónicas del cazador-recolector y el científico. Hay cierta ironía aquí. Como he señalado antes, los biólogos adoptaron hace mucho tiempo el término «evolución» para denotar lo que Darwin llamó «descendencia con modificación» y han estado criticando duramente a los científicos sociales que continúan aplicándolo en su sentido original de desarrollo progresivo. Sin embargo, no pueden evitar una visión de la historia (el despliegue de potenciales o capacidades pre-evolutivas) ¡que es fundamentalmente teleológica!

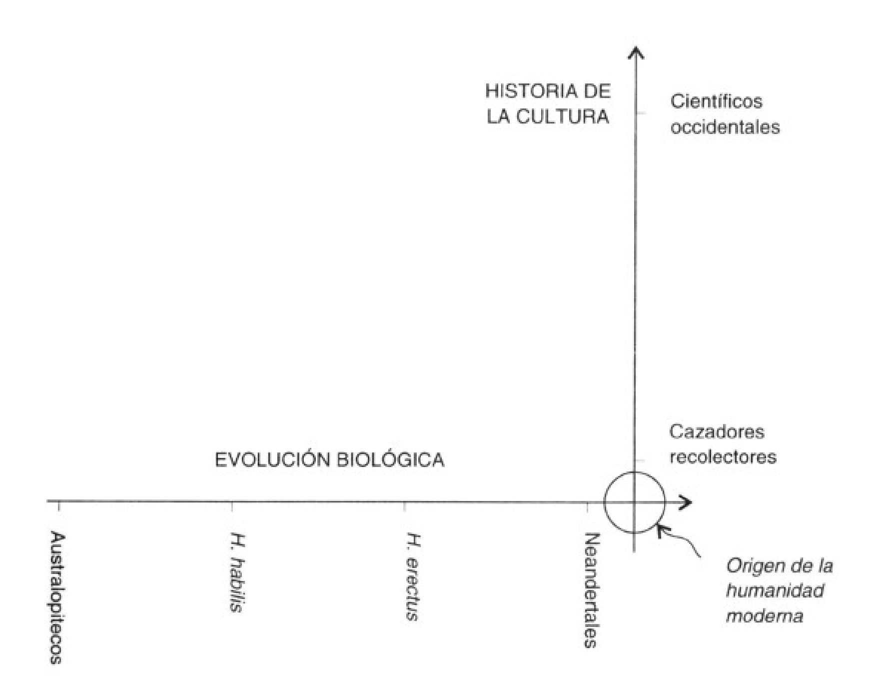


Figura 2. El origen de los «humanos modernos» en el punto de intersección entre los ejes de la evolución biológica y la historia de la cultura.

En resumen, la biología evolutiva contemporánea sigue anclada en la misma contradicción de siempre. Su afirmación de que la diferencia entre los seres humanos y sus predecesores es sólo cuestión de grado sólo puede sostenerse si se atribuye el movimiento total de la historia, desde la caza y recolección pleistocénica hasta la ciencia y la civilización moderna, a procesos sociales o culturales que se diferencian esencialmente, y no sólo en grado, del proceso evolutivo. Por supuesto, esta contradicción es sólo un caso particular de una paradoja más general en el corazón del pensamiento occidental: no hay forma de entender la participación creativa del ser humano en el mundo sin salirse de él. El distanciamiento o desapego del observador humano respecto del mundo observado, generador de la dicotomía entre razón y naturaleza, es el punto de partida de las ciencias naturales, incluida la biología evolutiva. Cuando el científico se contempla en el espejo de la naturaleza, contempla su propio poder de razona-

miento en el reflejo invertido de la selección natural. Aunque los teóricos de la evolución afirman haber prescindido de los arcaicos dualismos sujeto/objeto y mente/cuerpo, característicos del pensamiento occidental, éstos siguen vigentes. Lo que sucede es que han sido reemplazados por la oposición entre el científico, en cuya imaginación soberana se revela el diseño de la naturaleza, y el cazador-recolector, cuyo comportamiento se interpreta como el resultado de disposiciones innatas e inconscientes generadas por la selección natural. Aunque la biología neodarwinista proclama la continuidad evolutiva entre la humanidad y el resto del reino animal, esta continuidad se aplica a los humanos como cazadores-recolectores, no como científicos, y ambas categorías sólo pueden coexistir recuperando la distinción esencial entre la humanidad y la naturaleza, lo que compromete la tesis de la continuidad.

De la evolución a la historia

Para resolver las paradojas de la distinción y de la continuidad debemos encontrar una manera de estudiar a los seres humanos que no parta de la premisa de nuestro distanciamiento del mundo, sino de nuestro compromiso con él. Ésta es, para mí, la tarea principal de mi disciplina, la antropología; y los antropólogos están especialmente cualificados para acometerla, en razón de su familiaridad con formas de pensar no occidentales. Aquí me gustaría volver a la discusión anterior sobre la socialidad de los cazadores-recolectores. He señalado que la suya es una socialidad fundamentalmente *relacional*, en el sentido de que las personas adquieren su identidad en el contexto de historias de compromiso continuado con los demás. Las relaciones están *plegadas* en las personas, en sus capacidades, disposiciones e identidades particu-

lares, y *se despliegan* en acciones sociales finalistas. No obstante, este plegamiento y despliege no puede entenderse en el esquema del discurso occidental dominante sobre el individuo y la sociedad, un discurso que tiende a negar que los cazadores y recolectores tengan vida social. ¿Qué ocurre si, en vez de contemplar las vidas de los cazadores-recolectores a través de ojos occidentales, invertimos la perspectiva y examinamos nuestra propia experiencia aplicando un conocimiento agudizado por lo que los cazadores y recolectores tienen que contarnos?

Creo que veríamos que la corriente subyacente de socialidad relacional no está en absoluto limitada a los cazadores-recolectores, sino que recorre y conecta las vidas de gente de todos los lugares, del pasado y del presente, incluidos los habitantes de las urbes modernas. En tal caso, las implicaciones de esta forma de socialidad para la constitución de las personas podrían generalizarse. Esto quiere decir que no podemos seguir aceptando la tesis neodarwinista ortodoxa de que las capacidades humanas están especificadas de antemano, a la espera de desarrollarse, en virtud de alguna dote innata que cada individuo recibe en el momento de su concepción. Por el contrario, creo que estas capacidades son propiedades emergentes del sistema de desarrollo global que se constituye cuando la persona en ciernes se integra en un campo más amplio de relaciones, las más fundamentales de las cuales son las relaciones con otras personas.

Por consiguiente, discrepo de mi colega Michael Carrithers cuando argumenta que la socialidad debería entenderse como un rasgo heredado y codificado genéticamente, que «se expresa en los individuos» y «se establece a través de la fuerza de la selección natural». Para Carrithers, las relaciones sociales son el resultado evidente de la asociación de múltiples individuos, cada uno de ellos preprogramado por separado para un comportamiento

cooperativo o altruista. Yo opino que la socialidad es inmanente al campo de relaciones en el que empieza toda vida humana, y en cuyo seno ésta busca su realización. Podemos estar seguros de que la socialidad existe desde el principio de la persona y, en ese sentido, podría considerarse innata. Con esto no quiero decir, sin embargo, que sea previa a la constitución de los individuos concretos, sino que es anterior a las relaciones que constituyen su existencia en el mundo. La socialidad, que es inmanente a este mundo, es el terreno relacional a partir del cual crece toda la existencia humana. Por tanto, en lugar de contemplarla como algo que evoluciona, debemos verla como un potencial generador de un campo relacional, cuyo despliegue es equivalente a un proceso evolutivo. ¿Cuál es, entonces, el significado de «evolución»?

Para expresarlo en términos más generales, la evolución es el proceso por el que los organismos adquieren sus formas y capacidades particulares y por el cual, a través de acciones situadas en su entorno, establecen las condiciones de desarrollo de sus sucesores. Visto así, los organismos humanos están a la misma altura que los no humanos. Los niños humanos, como los jóvenes de muchas otras especies, crecen en entornos modelados por la actividad de las generaciones precedentes y, al hacerlo, acarrean las formas de su entorno en sus cuerpos, en forma de habilidades, sensibilidades y disposiciones específicas. Pero no las acarrean en su genes, ni tampoco es necesario invocar vehículos culturales de transmisión de información intergeneracional para explicar la diversidad de los acuerdos sociales humanos. Es la noción misma de información, la de que la forma se introduce en contextos de desarrollo medioambientales, la que es errónea. Porque, como he explicado, es dentro del movimiento de la vida social, en el contexto del compromiso práctico entre los seres humanos, así como entre éstos y su medio ambiente, donde se generan las for-

mas institucionales, incluidas aquellas que reciben el nombre de sociedades.

Es más, como hemos visto, este proceso no es otro que el desarrollo de la historia. Ya he aludido al comentario de Marx de que la historia es algo que construye la gente. Basándose en Marx, el antropólogo Maurice Godelier ha propuesto que los seres humanos hacen historia no sólo porque viven en sociedad, sino porque participan en su creación. Mi postura, sin embargo, es que la creación de formas sociales no tiene lugar en el vacío, sino con el trasfondo de lo que la gente hace o hizo en el pasado para transformar las condiciones de desarrollo de las generaciones futuras. Permítaseme sugerir una analogía con la agricultura. Los agricultores no crean los cultivos, sino que los hacen crecer. Mediante su trabajo en los campos establecen las condiciones ambientales para el desarrollo saludable de las plantas. Así, de la misma manera que los agricultores hacen crecer sus cultivos, la gente «se hace crecer» mutuamente. Lo que sugiero es que la historia se gesta en este crecimiento de las personas más que en la creación de la sociedad.

Si partimos de la consideración de «personas en su entorno» en vez de «individuos autocontenidos», podemos disolver la dicotomía entre evolución e historia, fuente de tantos problemas y malentendidos en el pasado. La historia, entendida como un proceso por el que las personas establecen sus respectivas condiciones de desarrollo a través de sus prácticas sociales en relación a los demás, no es más que un caso específico de un proceso que se verifica en todo el mundo orgánico. Así pues, no necesitamos una teoría para explicar cómo los simios se volvieron humanos y otra para explicar cómo (algunos) humanos se volvieron científicos. Cuando reconocemos que la historia es la continuación de un proceso evolutivo, pero con un nombre diferente, desaparece el

punto de intersección entre los ejes evolucionista e histórico, y la búsqueda de los orígenes de la sociedad, de la historia y de la verdadera humanidad se convierte en la búsqueda de un espejismo.

Pero la distinción entre evolución e historia no es la única división que se viene abajo con el argumento que acabo de proponer. Mi crítica también ataca la distinción ortodoxa fundamental entre evolución y desarrollo, o entre filogenia y ontogenia. La base de este principio es que cada individuo recibe de sus predecesores una especificación de forma independiente del contexto, conocida como *genotipo*, la cual se expresa o «se realiza» en el transcurso de su historia vital como un *fenotipo* concreto que depende del entorno. Desde que la doctrina lamarckiana de la herencia de los caracteres adquiridos fue demolida por August Weismann a finales del siglo XIX, se ha asumido que sólo las características del genotipo, y no del fenotipo, se transmiten de generación en generación.

Creo que uno de los mayores espejismos de la biología moderna es suponer que los elementos constituyentes del diseño se incorporan de este modo en el organismo, como una especie de desarrollo arquitectónico. Podemos estar seguros de que cada organismo empieza su vida con todo su ADN en el genoma; pero el ADN, por sí solo, no especifica nada. No hay ninguna «lectura» del código genético que no forme parte del desarrollo del organismo en su entorno. Por su puesto, el organismo no empieza su vida sólo con ADN. Como señala Susan Oyama en su importante libro *The Ontogeny of Information: Developmental Systems and Evolution*, lo que se transmite literalmente de generación en generación «es un genoma y un segmento del mundo». Ambas cosas constituyen un sistema en desarrollo en cuyo despliegue, a través del ciclo vital del organismo, la forma emerge y se susten-

ta. Por tanto, cualquier descripción de la evolución de las formas debe tener muy en cuenta el proceso de autoorganización dinámica mediante el cual estos sistemas se constituyen y reconstituyen en el tiempo. Lo que he hecho en este capítulo es demostrar esta proposición para los organismos humanos, que crecen en un mundo social y juegan su papel en la construcción de la historia.

Permítaseme concluir volviendo a la imagen de la piedra que cae. No creo que podamos hablar de la evolución de las formas orgánicas con una certidumbre parecida. Creo que el paradigma neodarwinista está plagado de contradicciones y he intentado señalar algunas de ellas. Me gustaría pensar, sin embargo, que el mismo Darwin, si estuviera entre nosotros, miraría con buenos ojos mis esfuerzos. Porque Darwin no era darwinista, y menos aún neodarwinista, sino que era mucho más sensible al mutualismo entre organismos y medio ambiente que muchos de los que hoy en día citan su nombre en apoyo de su causa. Pero, por encima de todo, Darwin era un científico genuino, que estaba preparado para desafiar la ortodoxia de su tiempo cuando la razón, las pruebas y la honestidad intelectual lo requerían. Es curioso, y también preocupante, que la herejía de Darwin se haya convertido actualmente en una nueva ortodoxia, que bordea la fe en algunos casos. Quienes claman que el neodarwinismo debe ser correcto *porque no hay alternativa*, y descalifican a quienes dudan como herejes y enemigos de la ciencia, son seguramente los Wilberforces de finales del siglo XX.

BIBLIOGRAFÍA

Carrithers, M., *Why Humans Have Cultures*, Oxford University Press, Oxford, 1992. [Trad. esp.: *¿Por qué los humanos tenemos culturas?*, Alianza Editorial, Madrid, 1995.] (Véanse especialmente los capítulos 3 y 4. Carrithers argu-

menta que la socialidad es un rasgo innato que se transmite genéticamente y que ha evolucionado por selección natural darwiniana.)

Clastres, P., *Society Against the State*, Blackwell, Oxford, 1977 (publicado originalmente en 1974 con el título *La Société contre l'état*). (En esta descripción de la etnografía de los indios de Sudamérica, Clastres muestra que los principios de su organización social y política son fundamentalmente contrarios a los que rigen en los estados centralizados.)

Fortes, M., *Rules and the Emergence of Society* (Royal Anthropological Institute Occasional Paper 39), RAI, Londres, 1983. (En este breve libro postumo, el reconocido antropólogo social Meyer Fortes argumenta que la sociedad humana es la única que está fundada en leyes y, en consecuencia, no tiene contrapartida en el reino animal.)

Godelier, M., «Incest taboo and the evolution of society», en A. Grafen (ed.), *Evolution and its Influence*, Clarendon Press, Oxford, 1989, págs. 63-92. (En este libro, Maurice Godelier explora las implicaciones de la tesis de que los seres humanos son los creadores de sus propias sociedades, con especial atención a las relaciones de parentesco.)

Ingold, T., *Evolution and Social Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986. (Un estudio sobre cómo se ha esgrimido la idea de evolución en el contexto del debate antropológico, desde mediados del siglo XIX hasta la actualidad, comparando los enfoques biológico, histórico y antropológico en el estudio de la cultura y la vida social humana.)

Ingold, T., «Becoming persons: consciousness and sociality in human evolution», en T. Ingold (ed.), *Evolutionary Models in the Social Sciences* (edición especial de *Cultural Dynamics 4* (1991), págs. 355-378). (En este artículo argumento que la personalidad no se «añade» al organismo humano mediante socialización o endoculturación, sino que más bien surge dentro del proceso de desarrollo del organismo en un entorno que incluye otros organismos-personas. Los artículos de Paul Craves, Mae-Wan Ho y John Shotter en esta misma edición especial tratan temas relacionados.)

Kuper, A. (ed.), *Conceptualising Society*, Routledge, Londres, 1992. (Diversos antropólogos sociales y culturales contemporáneos de primera fila discuten sobre el significado de «sociedad» y «socialidad».)

Oyama, S., *The Ontogeny of Information: Developmental Systems and Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985. (Una filósofa de la biología muestra que el pensamiento actual aún está impregnado de la dicotomía ambiental/innato, y que para superarla es necesario poner el énfasis en las propiedades de autoorganización de los sistemas en desarrollo.)

Premack, D. y A. J. Premack, «Why animals have neither culture nor history», en T. Ingold (ed.), *Companion Encyclopedia of Antropology: Humanity, Culture and Social Life*, págs. 350-365, Routledge, Londres, 1994. (Comparando los distintos mecanismos por los que la información se transmite de generación en

generación, Premack y Premack argumentan que los humanos son únicos en cuanto a su capacidad de transmitir conocimiento mediante la pedagogía, lo que a su vez es la base de la cultura y la historia.)

Viveiros de Castro, E., «Society», en A. Barnard y J. Spencer (eds.), *Encyclopedia of Social and Cultural Antropology*, Routledge, Londres, 1996, págs. 514-522. (Un repaso sucinto y brillante de los distintos significados de «sociedad» y sus implicaciones para la teoría antropológica.)

Wolf, F., «Inventing society», *American Ethnologist* 15 (1988), págs. 752-761. (Wolf estudia el pedigrí del concepto de sociedad en la historia reciente del pensamiento occidental y sostiene que se ha convertido en un obstáculo porque predispone a pensar en términos de unidades cerradas en vez de campos de relaciones.)

Woodburn, J., «Egalitarian societies», *Man* (N. S.) 17 (1982), págs. 431-451. (Este artículo revisa la etnografía de las sociedades de cazadores y recolectores contemporáneos para mostrar que en algunas de estas sociedades, caracterizadas por sistemas de producción en los que existe una devolución inmediata del trabajo, la igualdad no sólo se afirma como principio, sino que también se consigue en la práctica.)

La evolución de la novela

Gillian Beer

GILLIAN BEER ocupa la cátedra Eduardo VII de lengua inglesa y es presidente del Clare College de la Universidad de Cambridge. Sus libros *Darwin's Plots* (1983) y *Open Fields: Science in Cultural Encounter* (1997) tratan las mismas cuestiones planteadas en este ensayo. También ha escrito numerosas obras de ficción.

Al principio me sorprendió que me invitaran a escribir sobre «La evolución de la novela», pues no creo que la novela haya evolucionado. He dedicado parte de mi obra a demostrar que es una de las malas aplicaciones de la metáfora evolutiva, una aberración teórica que ha provocado confusión (y cosas peores) en otras áreas del conocimiento, como pueden ser la musicología y las relaciones raciales. Pero esta invitación me da ocasión de tratar, por una parte, los efectos de la mala aplicación de dicha metáfora a la historia de la ficción y, por otra, el impulso creador con el que los escritores han respondido a las ideas evolucionistas y sus implicaciones contradictorias. En mi opinión, estos novelistas han expresado sobre todo las tensiones entre y dentro de las corrientes darwinistas, así como su relación con lo humano.

La ficción siempre prospera allí donde hay contradicciones, y la teoría evolutiva ha proporcionado tanto historias contradictorias como interpretaciones dispares. ¿Es una descripción del desarrollo o de la degeneración? ¿El desarrollo implica inevitablemente progreso o es una nueva versión del Pecado Original? ¿Tiene cabida el altruismo en la evolución o sólo hay sitio para

una espantosa lucha por unos recursos siempre limitados? ¿Es la evolución individual o colectiva? La teoría evolutiva es más fructífera para la ficción por sus contradicciones que por su coherencia. No puede negarse que constituía una teoría generalizadora que podía explicar la historia de todos los seres de la Tierra en virtud del principio de la descendencia con modificación a través de la selección natural. Las implicaciones para el comportamiento humano se presentaron de maneras harto incompatibles: Darwin había suprimido completamente al ser humano del hilo argumental de *El origen de las especies*, mientras que *El origen del hombre* está profundamente influido por la etnografía y la antropología de la década de 1860, que a su vez estaba recurriendo en gran medida a *El origen de las especies* para justificar las teorías dominantes previas sobre el desarrollo social.

Algunos de los temas que examinaré se atisban en la novela de Laurence Sterne *Tristram Shandy*, cuyo primer volumen se publicó en 1759, cien años antes que el *Origen*. El padre de Tristram Shandy está perorando como de costumbre; el tío Toby, como de costumbre, intenta entender lo que dice:

> «¿Es que los reinos y las provincias, las ciudades y los pueblos, no tienen todos su duración? Y cuando esos principios y poderes, que en un principio se aliaron y unieron, hayan realizado sus evoluciones, terminarán cayendo». «Hermano Shandy», dijo mi tío Toby, dejando su pipa al oír la palabra *evoluciones*. «¡Quiero decir revoluciones!», dijo mi padre. «Quiero decir revoluciones, hermano Toby; lo de las evoluciones es un disparate» «No es ningún disparate», dijo mi tío Toby.
>
> (*Tristram Shandy*, cap. 5, pág. 3)

Este contraste entre evolución y revolución ha adquirido un importante sentido desde el tiempo de Sterne; pero aquí el señor Shandy entiende la revolución como un giro, un regreso al punto de partida. El término «evolución» es más radical, como se desprende de las dos últimas frases de la conversación.

El pasaje de *Tristram Shandy* que acabo de citar, con sus ciudades-estado y gobiernos, con su ascenso y caída de las sociedades humanas, su progreso y su recesión, revela hasta qué punto se da por sentado que los asuntos humanos sirven como modelo para el estudio del mundo natural. (Karl Marx comentó agudamente en una carta a Fiedrich Engels que «en Darwin, el reino animal toma la forma de sociedad civil».) En el trasfondo del diálogo de Sterne ya puede oírse el lamento darwinista: el pasado perdido se vislumbra, alterado, en el presente; la imposibilidad de conocer el futuro *no* implica que sea un disparate. Es más, en el argumento del señor Shandy y en el diálogo completo se sugiere un aplomo y una conformidad que Darwin no compartiría: «terminarán cayendo» sobre ciertos cimientos. Las historias de Darwin nunca aprueban este confortable conservadurismo: no sobrevive ningún estado original al que se pueda retornar.

Para empezar, brevemente, la metáfora evolutiva se aplica al género novelesco en forma de autoelogio. Se asume orgullosamente que los lectores de novelas se volvieron más inteligentes después de Henry James, y que lo mismo sucedió con los novelistas. Esta afirmación se basa en la idea de que, a finales del siglo XIX, la novela se había hecho «mayor de edad» o había «alcanzado la madurez» (por utilizar ese tipo de comentario que, afortunadamente, ha pasado un tanto de moda). Es decir, la novela había aprendido a ser (cada vez con más éxito) como un lector actual. No puede negarse que los lectores posteriores a Henry James se han vuelto más hábiles en la lectura de Henry James. No obstante, sin que nos demos cuenta se han perdido otras habilidades: la de escribir y leer una novela como ejercicio religioso consciente de preparación para la muerte, una función que cumplió *Clarissa* para los primeros lectores de Samuel Richardson; o la de comunicar y recibir un cúmulo de comentarios sarcásticos

e información erótica mediante la alusión a los clásicos, como hizo Henry Fielding en *Joseph Andrews*.

La mayoría de las traslaciones de la «evolución» a otros ámbitos invocan esta teoría para justificar elecciones humanas en el terreno político, social y psíquico. En estos usos, la llamada «selección natural» es, en realidad, una *selección artificial naturalizada*. Las elecciones deliberadas y las determinaciones políticas se presentan como aspectos de un proceso natural inevitable. Cuando el modelo evolutivo se aplica a la literatura se utiliza para reforzar la autoridad del canon literario actual y para fijarlo (en contra de principios evolutivos más creativos). En las recientes «guerras del canon» literarias podría haberse utilizado el argumento de que la selección natural hace que los mejores sobrevivan y marquen la pauta: el tiempo ha cribado las «obras maestras» y las ha separado de la «paja», y si sobreviven es porque son aptas para sobrevivir.

Personalmente, no deseo que se pierda ninguna de estas obras maestras. El problema es la implicación, derivada de la versión spenceriana de la selección natural, de que aquellas obras que *no* encajan en el canon actual *no* son aptas para sobrevivir y *no* merece la pena leerlas. En tiempos recientes, las publicaciones de signo feminista y otros grupos excluidos han desaprobado esos patrones irreversibles. Por fortuna, a diferencia de los organismos, los libros impresos no suelen extinguirse, aunque se haga caso omiso de ellos. Siempre queda alguna copia en algún anaquel esperando ser leída de nuevo.

Los libros también pueden recuperarse y adquirir un significado diferente para una nueva generación del que tenía para sus primeros lectores. Ésta es una de las claves del intrigante relato *Pierre Menard, autor del Quijote*, de Jorge Luis Borges, donde el libro de Cervantes, escrito por un autor contemporáneo, se con-

vierte en un libro diferente del original del siglo XVII aunque las palabras sean las mismas. En la siguiente cita, el narrador de Borges habla primero y luego alterna citas de Cervantes y Menard.

> Es una revelación cotejar el don Quijote de Menard con el de Cervantes. Éste, por ejemplo, escribió (*Don Quijote*, primera parte, capítulo noveno):
>
> *... la verdad, cuya madre es la historia, émula del tiempo, depósito de las acciones, testigo de lo pasado, ejemplo y aviso de lo presente, advertencia de lo por venir.*
>
> Redactada en el siglo XVII, redactada por el «ingenuo lego» Cervantes, esa enumeración es un mero elogio retórico de la historia. Menard, en cambio, escribe:
>
> *... la verdad, cuya madre es la historia, émula del tiempo, depósito de las acciones, testigo de lo pasado, ejemplo y aviso de lo presente, advertencia de lo por venir.*
>
> La historia, *madre* de la verdad; la idea es asombrosa. Menard, contemporáneo de William James, no define la historia como una indagación de la realidad, sino como su origen. La verdad histórica, para él, no es lo que sucedió; es lo que juzgamos que sucedió. Las cláusulas finales (ejemplo y aviso de lo presente, advertencia de lo por venir) son descaradamente pragmáticas.
>
> También es vivido el contraste de los estilos.
>
> (*Ficciones*, pág. 51)

Imbuido con las preocupaciones de un nuevo tiempo (en este caso el pragmatismo, pero también podría ser el feminismo, por «madre del conocimiento»), las palabras de Cervantes se cargan con referencias del siglo XX y emergen, como sugiere Borges, de una nueva pluma. Menard, el autor imaginario, reescribe palabra por palabra, con gran esfuerzo creativo, secciones enteras del Quijote. Incluso copiar, sugiere Borges, implica expandir y cambiar, no sólo replicar, porque el copista realiza su tarea en una época diferente, para nuevos lectores en un entorno diferente. La fábula proporciona una imaginativa interrogación, modesta pero fundamental, sobre la metáfora evolutiva que afirma que la literatura «se desarrolla». Aquí, por el contrario, los textos antiguos pueden decimos cosas tan actuales como los nuevos.

Una aplicación mucho más calamitosa de la idea de selección natural, particularmente relevante para el trabajo de determinados novelistas, es la relación de la teoría evolucionista con las

teorías raciales. La noción de que la sociedad humana ha seguido un proceso de desarrollo inevitable a lo largo del tiempo, del hombre primitivo a lo que los etnógrafos del siglo XIX llamaban «el hombre europeo moderno», se tomó como una aprobación implícita de la colonización y extinción de los pueblos indígenas. La teoría evolutiva decimonónica podía invocarse para reforzar esta posición. Por supuesto, este pensamiento era anterior a Darwin, pero su combinación con la idea de «la supervivencia del más apto» de Herbert Spencer ofreció el aparente beneplácito de la ciencia a las teorías racistas posteriores. Joseph Conrad busca a ciegas alguno de sus resultados en su pesimista *El corazón de las tinieblas*, donde la connivencia entre el comercio occidental y la autopercepción del occidental como «ser civilizado» expolia el continente africano y, al mismo tiempo, se adhiere codiciosamente a su promesa aparente de liberación «primitiva». Sin embargo, en la introducción del capítulo 4 del *Origen*, titulado «Selección Natural», Darwin había insistido en que este proceso podía operar más armoniosamente cuando los habitantes de una zona tenían tiempo y aislamiento suficientes para variar y encontrar nichos ecológicos múltiples sin interrupciones ni intrusiones desde el exterior.

> En tal caso, cada pequeña modificación que pudiera surgir en el transcurso de los años y que de algún modo favoreciera a los individuos de alguna de las especies, por adaptarlos mejor a las condiciones modificadas, tendería a conservarse, y la selección natural tendría campo libre para la tarea de mejoramiento.
>
> (*El origen de las especies*, cap. 4)

A diferencia de lo que sugiere Tim Ingold en el capítulo 5 de este volumen, Darwin no pensó siempre que la capacidad cerebral de los individuos de las sociedades tribales estuviera determinada y limitada por su presente ubicación en el orden del mundo. Por el contrario, sus encuentros con los fueguinos, primero con los que embarcaron en el *Beagle* tras una estancia obli-

gada de algo más de un año en Londres y luego con otros bajo la lacerante lluvia y el humo de la Tierra del Fuego, le convencieron ya en la década de 1830 de hasta qué punto la capacidad intelectual humana supera las circunstancias que limitan su expresión.

Las ideas reflejadas en la teoría evolutiva de Darwin

Los distintos aspectos de la teoría evolutiva adoptados en otros campos pueden proporcionarnos una útil relación de los conceptos discordantes que actúan en el seno de la «evolución», tanto en el ámbito científico como en el cultural. La obra de Darwin está impregnada de las poderosas ideas que en ella se reflejan. El autor del *Origen* baraja tres conceptos cruciales: la hiperproductividad, la variabilidad y la selección. No todos ellos apuntan en el mismo sentido. La hiperproductividad y la variabilidad sugieren un mundo copioso y generoso, que expresa siempre un potencial imprevisto. Esta hiperproductividad es necesaria para que las poblaciones no se debiliten, pero contiene su propia amenaza de destrucción. La variabilidad introduce individuos diversos en el entorno; el principio creativo no se basa en el parecido con los padres, sino en su diferencia. La variabilidad no privilegia la norma. Lo extraño, lo extravagante, lo «aparentemente monstruoso», junto con su capacidad de reproducirse, son potencialmente más valiosos que la forma habitual. Al lado de este generoso tumulto aparece un principio más frugal: la selección, que insiste en que para sobrevivir hay que adecuarse a las condiciones del entorno inmediato. Darwin tuvo dificultades para distinguir en su obra entre la selección artificial (una selección inducida culturalmente para la reproducción de animales domésticos, que somete a otras criaturas a la voluntad de la hu-

manidad) y su nuevo concepto de «selección natural». Este principio, afirma, trabaja para el bien del individuo, no subordina una especie a la voluntad de otra y tiene lugar mediante procesos lentos e inconscientes, sin que exista una intervención deliberada, como sucede en la artificial. Darwin luchó para despojar a la selección natural de sus componentes culturales; por ello la distinguió de la selección artificial y de la selección sexual.

Aunque insisto en que el concepto decimonónico de «evolución» no puede aplicarse correctamente a la historia de la novela *como género* (sobre todo cuando implica ideas de desarrollo y complejización) no pretendo de ninguna manera que las ideas evolutivas no hayan sido importantes para ciertos autores de ficción. La ficción es algo así como un experimento mental, que establece escenarios hipotéticos sin consecuencias inmediatas para el lector. Como escribió Darwin el 30 de diciembre de 1834 en *El viaje del Beagle* (p. 311): «Conocer el límite del conocimiento humano en cualquier tema, sea cual fuere, posee siempre un gran interés, que quizá se incrementa por su proximidad al reino de la imaginación».

Muchos novelistas han contestado, puesto a prueba o luchado contra la aplicación de patrones evolutivos a la narrativa, y se han comprometido con las profundas ideas que han impregnado nuestra cultura desde Darwin. Por citar unos pocos ejemplos, *Tess la de los D'Urbervilles* de Thomas Hardy estudia el descenso social de una familia «extinta en la línea masculina» y la aparición de la fructífera Tess, una «mujer casi corriente» cuya promesa de excelencia humana y genética se echa a perder a causa de la violación y los prejuicios sociales. *Victoria* de Conrad y, de una manera diferente, su *Corazón de las tinieblas* exploran la violenta recursividad potencial que se encuentra siempre en aquellos que se creen en la cima del progreso civilizado. En *Ulises*, James Joyce

mezcla en el capítulo «Los bueyes del sol» la historia del lenguaje con la historia de un niño, desde la concepción hasta el nacimiento. Estas obras no sólo imitan las teorías darwinistas, sino que también pueden reescribirlas en un sentido borgesiano, copiándolas para producir nuevas complicidades. Pero es más corriente que disientan de ellas y saquen a flote los problemas internos de la teoría.

Nos centraremos ahora en los mundos imaginarios que surgieron de la influencia de Darwin. Como muchos elementos en esta historia, es paradójico que en el habla ordinaria la palabra «evolución» se haya convertido en un término general que justifica cualquier tipo de cambio. La evolución promete (o parece prometer) que un proceso en apariencia vacilante tiene un propósito (la evolución de la sanidad pública o de las Naciones Unidas son dos ejemplos de ello). Esta promesa de un plan previsible es contradictoria, pues la teoría darwiniana no implica nada parecido. Es más, Darwin tuvo que socavar el lenguaje de la teología natural, que ponía énfasis en la «providencia» y la «creación», para dar cabida a una teoría basada en la producción que no tenía ningún resultado global ni específico. La obra de Darwin hace hincapié en que el futuro no puede conocerse, debido *precisamente* al proceso evolutivo, con su énfasis en la multiplicidad, la variabilidad y la interacción entre los organismos. La idea de evolución es muy anterior al siglo XIX, pero fue entonces cuando entraron en sintonía con la alta estima que tenía la idea de *cambio* en otras áreas de la vida social (las prácticas industriales, por ejemplo). Pero no implican necesariamente una secuencia controlada; también puede concebirse un cambio catastrófico.

Las narrativas evolucionistas anteriores tomaban como modelo el ciclo vital de los organismos y las transformaciones que tienen lugar: las larvas se vuelven libélulas, los niños se convierten

en adultos, etc. Estas transformaciones siguen una secuencia predecible; si el organismo no la completa es porque ha muerto en el camino. La transformación confirma la teleología, la existencia de un plan. La *Bildungsroman* (o novela de desarrollo) alemana, con su énfasis en el crecimiento hacia la edad adulta y el acomodo en la sociedad, describe un proceso similar, donde las transformaciones adquieren coherencia; el *Wilhelm Meister* de Goethe es un ejemplo de ello.

Pero si trasladamos este proceso de transformación de la ontogenia a la filogenia (del desarrollo del individuo al de la especie) surgen posibilidades diferentes y turbadoras. Lo más importante es que el futuro de la especie no puede predecirse. No está determinado rígidamente por una gramática de desarrollo ineludible *al nivel de la especie*.

Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural o la preservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida (por dar a la obra su completo e inquietante título): la historia que cuenta Darwin no tiene ni principio ni final. Declara categóricamente que no le preocupa el origen de la vida. Los inmensos desastres del pasado no le animan a prever el futuro. Es más, la capacidad de supervivencia de una especie es el resultado de ligeras mutaciones en innumerables individuos, algunas de las cuales resultan acordes con las demandas actuales del entorno y permiten que el individuo tenga descendencia. Si estas demandas son estables, la fracción de su progenie que tenga las mismas características se encontrará a su vez en ventaja. En cambio, si las demandas han variado, sobrevivirán *otros* miembros de la prole. Todo esto es muy aleatorio, contingente y no demasiado reconfortante para la persona humana, a la que sólo se hace referencia una vez en todo el libro. Sin embargo, fueron muchas las personas (todas de sexo masculino) que trabajaron duramente como informadores

de Darwin en la construcción de su obra (al editar recientemente una nueva edición del libro, he localizado en el texto citas sobre más de 120 informadores, muchos de los cuales eran contemporáneos de Darwin y conocidos suyos, como «mi hijo» y «un hombre en el que creo ciegamente», probablemente un criado).

A Darwin le preocupan los procesos y los procedimientos: la selección natural, la selección artificial, la selección sexual. La narrativa retrospectiva de su obra mezcla libremente el tiempo y el espacio: las actividades evolutivas no sólo ocurrieron en el pasado, sino que también ocurren en el presente. Lo simple y lo complejo coexisten; el camino no es siempre hacia la complejidad. El tantas veces citado último párrafo del *Origen* enfatiza un movimiento ascendente («de un principio tan simple han evolucionado y están evolucionando una infinidad de las formas más bellas y maravillosas»), Pero Darwin reconoce en toda su obra que un organismo mantenido en un medio satisfactorio y estacionario no tiene por qué cambiar. Darwin pone énfasis en los cambios sutiles e inconscientes. Sin embargo, su lenguaje todavía está repleto de términos que connotan planificación e intervención («selección» y «preservación» son dos ejemplos palmarios de términos con los que Darwin mantuvo una relación ambivalente, por no hablar de «naturaleza»).

El lugar del ser humano

La presencia humana en el pensamiento de Darwin es ambigua; a veces parece faltar por completo. De ahí el atractivo de su teoría evolutiva. El ser humano no ocupa un lugar central en la teoría de la evolución de Darwin aunque sus atributos sigan siendo humanos. La humanidad no puede eludir la condición humana; estamos ligados a ella por el lenguaje, que siempre se

refiere a la medida humana de las cosas. La teoría evolutiva sugiere maneras, ya terroríficas y repulsivas ya placenteras, de entender al ser humano en relación a otras formas de vida. Determina un proceso, indiferente a la autoestima humana, que atrapa a los individuos en un cambio interactivo a gran escala. Pero, en general, para los seres humanos es más fácil pensar en términos de su lugar, su tiempo y sus allegados que en el ámbito más amplio de la interacción con otros organismos. La novela es la forma literaria más *posicionada*, basada en el detalle, el ejemplo y la instantaneidad. También está obsesionada, como forma, con el problema del cambio: un relato familiar en el que la progenie *se diferencia* de los progenitores tiene más enjundia que otro en el que los hijos se parecen a los padres.

La ausencia/presencia de lo humano en la teoría darwiniana, tal como la presenta el mismo Darwin, ha sido una tentación para muchos autores de ficción. La escasa presencia de lo humano en el argumento del *Origen* produce un coqueteo que desespera a sus lectores y comentaristas, quienes anhelan reinstalar a la humanidad en un lugar central y estable. Es revelador que el error más frecuente al aludir a la obra de Darwin es citarla como *El origen de LA especie*: el artículo vuelve a colocar a lo humano en una posición central; ¿cuál, si no, podría ser *la* especie?

Esta inhibición no implica una ausencia de referencias a lo humano en el texto o en su pensamiento. En una carta a Engels, Marx escribió que «es extraordinaria la manera en que Darwin reconoce, entre bestias y plantas, a su sociedad inglesa con su división del trabajo, su competitividad, su abertura de nuevos mercados, sus "invenciones" y la "lucha por la vida" malthusiana». Es aún más revelador, por supuesto, que Marx sólo recogiera del discurso aquellos elementos que armonizaban con sus propias preocupaciones.

Darwin leyó literatura de ficción a lo largo de toda su vida, tal como se desprende de sus cartas y cuadernos de notas. Leyó a Jane Austen, por ejemplo, antes de que se pusiera de moda. En sus años de madurez y vejez, le gustaba que su esposa Emma le leyera novelas en voz alta. En *El origen del hombre* cita al filósofo alemán Arthur Schopenhauer para justificar su interés por las «intrigas amorosas» como hechos «de una importancia realmente mayor que todos los demás objetivos de la vida humana», pues determinan «la composición de la siguiente generación... la prosperidad o el infortunio aún por venir de la raza humana». Darwin se avergonzaba, innecesariamente, de su afición a leer novelas (quizá porque sus autores favoritos eran mujeres) a la que alude en su autobiografía como prueba de su chochez. Prefería las historias con final feliz (por ello encontraba difícil de sobrellevar el peso de los escrúpulos en George Eliot, aunque le gustó *Adam Bede*). Las historias que *él* había ofrecido al mundo no tenían estos finales felices. Por el contrario, tenían un principio inexplorado, un proceso inexorable, sucesos irreversibles e incertidumbre al final. Por otra parte, a la luz de las obras de Thomas Hardy o George Gissing, podemos hablar de la estructura narrativa implícita en Darwin y que estos autores toman en parte de él. La obra de Darwin, al mismo tiempo, también podría generar un énfasis en la mejora, en la salvación de las dificultades, aun a costa de la eliminación de aquellos aparentemente menos aptos para el mundo moderno. No obstante, incluso en la obra de novelistas como Rider Haggard se admite cierta tristeza cuando las tribus primitivas dejan paso a las incursiones del colonizador.

Las teorías económicas, raciales y lingüísticas, el encuentro con los indígenas, todo ello se funde en el crisol del pensamiento darwiniano. En *El viaje del Beagle*, el naturalista escribió estas palabras acerca de su estancia en Nueva Zelanda: «Dondequiera

que los europeos han llegado, la muerte parece perseguir al aborigen». Es más, creo que su experiencia acerca de las revoluciones, las sublevaciones, las guerras genocidas, la colonización y sus efectos participó en la construcción del concepto de selección natural tanto como sus encuentros con los pinzones y las tortugas de las Galápagos. También influyeron en él sus lecturas de autores como Walter Scott, cuyas novelas exploran los procesos de cambio por los cuales una nación-cultura sucumbe a la pujanza de otra.

Walter Scott demuestra que el vigor de un grupo indígena no sólo se debilita por la fuerza militar, sino también por cambios sutiles y prolongados en las expectativas, la presión de los poderes económicos y la posesión de tierras.

Scott describió estos procesos (y también la resistencia con la que se los seguía combatiendo) en novelas como *Waverley* y *Old Mortality*. Las novelas de este autor suelen naturalizar, de muy mala gana, el proceso de extinción cultural. Darwin mostró una actitud parecida cuando visitó la tierra de van Diemen[6] durante el viaje del *Beagle*. Este estilo de explicación, que mezcla los escrúpulos con cierto sentimiento de inevitabilidad, se encuentra ya en Scott (y permite que la colonización continúe). Pero Darwin leyó también ávidamente, mientras preparaba el *Origen*, las obras de Harriet Martineau, amiga de su hermano Erasmus, en particular, su novela histórica *The Hour and the Man*, cuyo héroe es Toussaint-L'Ouverture, líder de una sublevación de esclavos en las Indias. Las simpatías de Martineau oscilan entre el derecho de los esclavos a la libertad y la angustia por la brutalidad de la revolución. No obstante, el libro se centra en la figura del insurgente Toussaint, cuya revolución, a pesar de fracasar, se contempla como una etapa en el ascenso inevitable de su pueblo.

Por tanto, cuando se reivindica la teoría evolutiva como modelo para empresas intelectuales, estéticas e incluso publicitarias, tenemos que reconocer que la misma teoría de Darwin no fue un descubrimiento científico «autónomo», al que se llegó solamente por métodos empíricos controlados. El pensamiento evolutivo no es una trama, sino un cúmulo de influencias. Las grandes formulaciones originales de Darwin, que son anteriores a la genética, beben de muchas fuentes, y desde luego no todas científicas. Es más, la fuerza de su teoría reside en el eclecticismo de los hábitos mentales de Darwin. En su juventud todo le interesaba; a medida que fue envejeciendo, los detalles nunca dejaron de fascinarlo. Una mente de tal alcance y capacidad no puede dejar de encontrar contradicciones, aunque puede ser capaz de asimilarlas de manera harto sencilla. La vía de Darwin no es la fidelidad total a los principios de investigación baconianos. Desde luego, las implicaciones contradictorias de la teoría darwiniana han hecho que se interprete de muchas maneras y han creado confusión en muchas intersecciones.

La teoría evolutiva de Darwin es un sistema perturbado al mismo tiempo por la empatía y por la eliminación (Darwin habla del número infinito de generaciones del pasado, de la improbabilidad de que las especies actuales persistan en un futuro lejano). Éste ha sido un recurso principal para los escritores de ficción que quieren rescatar del olvido posibilidades, criaturas y personas perdidas. Es el caso de Hardy, que resalta el brillo de la madera del establo producido por las ancas de vacas que se rascaron contra ella durante generaciones; o, en *The Return of the Native*, el juego de máscaras que escenifican algunos participantes experimentados porque es un ritual conocido a fondo. La memoria es el material de la ficción; las generaciones desaparecidas, los pensamientos del pasado, también son un lastre necesario para las teorías de Darwin. La empatía (*Eingenfühl*) se siente desde

dentro. Cuando Darwin describe plantas, animales, aves o insectos, no se fija tanto en las vidas individuales como en sus interacciones. Las relaciones le fascinan y le inquietan: «La relación entre los organismos es la más importante de todas», escribe como resumen en el encabezamiento del *Origen*. Darwin piensa en categorías, consciente de las separaciones y afinidades entre y dentro de las especies. También piensa en la actividad de los zarcillos, atendiendo a la delicada impulsión del crecimiento, la sensibilidad a la distancia. Sus ojos siempre advierten la excepción. Su teoría se ocupa de la generación y la descendencia, de la transformación de las poblaciones. Sin embargo, al pensar sobre cómo se produce esta descendencia, siempre recurre a los organismos particulares. Esos organismos son transitorios y, aunque a veces dejan impresiones fósiles, la mayoría acaba como marga, estiércol o polvo.

La abundancia y la productividad eclipsan el proceso de pérdida, haciendo el presente tan denso que la vida pasada, impensable, se desvanece en la conciencia. Darwin afirma todo esto en el *Origen*. Lo que no expresa, ya que la reflexividad no es asunto suyo, es que la abundancia y la hiperproductividad son para su teoría tan útiles como reconfortantes. Su percepción de la pérdida es tanto evidencial como emocional: es *inconveniente* para demostrar sus argumentos que sobreviva tan poco (la materia blanda se deteriora); es íntimamente angustioso que el olvido sea tan profundo. Sabe, o piensa que sabe, cuán poca memoria le queda de la experiencia de la muerte de su madre, cuando él tenía ocho años: al cabo de un tiempo advirtió que de ella sólo habían sobrevivido unos cuantos recuerdos, frágiles e impersonales. El presente *tiene que* estar lleno.

La teoría de Darwin requiere al mismo tiempo la muerte de ingentes cantidades de seres *y* la intervención del individuo. Este conflicto es un desafío para novelistas como Theodore Dreiser, que se siente acosado por las nuevas poblaciones urbanas que se establecen por toda Norteamérica.

Los libros pueden convertirse en parte de la experiencia de muchos que ni siquiera los han leído si sus historias profundizan lo bastante en los deseos y los miedos de las generaciones subsiguientes. Creo que esto es lo que sucedió con la obra de Darwin. Borges utilizó metáforas evolutivas en *Otras Inquisiciones* para describir este proceso en relación a la obra de H. G. Wells:

> *The Time Machine, The Island of Dr. Moureau, The Plattner Story, The First Men in the Moon*.[7] Son los primeros libros que yo leí; tal vez serán los últimos… Pienso que habrán de incorporarse, como la fórmula de Teseo o la de Ahasverus, a la memoria general de la especie y que se multiplicarán en su ámbito, más allá de los términos de la gloria de quien los escribió, más allá de la muerte del idioma en que fueron escritos.
>
> (*Otras Inquisiciones*, p. 93)

De las varias disputas producidas por la teoría darwinista (y ampliadas a partir de ella), la que más fascinó a Wells fue la dudosa identificación del desarrollo con la idea de progreso. Wells fue discípulo del científico Thomas Huxley, de quien aprendió que esta evolución no albergaba ninguna promesa absoluta de mejora. Ésta fue la posición a la que Huxley llegó al final de su carrera, cuando vaticinó un «invierno universal» en el que sólo sobrevivirían «organismos simples y mezquinos como las diatomeas del Ártico… y el *Protococcus* de la nieve roja».

Darwin no se pronunció sobre este punto. Anhelaba creer en un progreso y lo afirmó en la salmodia del último párrafo del *Origen*; sin embargo, en su autobiografía reconoció que sus esperanzas se enfriaban no sólo por presiones internas al pensamiento evolutivo, sino también por la aparición paralela de otro podero-

so conjunto de ideas que parecía revocar cualquier tendencia hacia la perfección:

> Resulta intolerable pensar que [el ser humano] y todos los demás seres sensibles estén condenados a una aniquilación completa después de un progreso lento y continuado durante tanto tiempo.
>
> (*Autobiografía*, p. 153-154)

Los novelistas de finales del siglo XIX, a medida que abordaban el núcleo de las ideas darwinistas, pudieron manejar, y criticar, las implicaciones contradictorias del pensamiento darwiniano. ¿Se trata de una teoría que pone punto final a la teleología o que redefine la idea de plan? ¿Es una historia en la que la humanidad no ocupa un lugar privilegiado o que recurre a las actividades humanas para establecer todas las relaciones? ¿Es una historia de progreso o de decadencia? Aparte de la obra personal de Darwin, había que considerar su combinación con la sociología spenceriana y la insistencia eugenésica en la «supervivencia del más apto» aplicada a la vida humana. Pero esta lucha no se limitó a las contradicciones en el seno de la teoría y entre sus añadidos. Las presiones se intensificaron y se hicieron más complejas cuando surgieron las aparentes contradicciones *entre* la teoría evolutiva y la nueva física del tiempo.

Igual que Jack London y Edgar Rice Burroughs después que él, Wells quedó fascinado por los ensayos antropológicos de Huxley reunidos en su obra *Man's Place in Nature* (1863). En *La máquina del tiempo*, publicada en 1896, su viajero entra en un periodo futuro en el que la especie humana se ha dividido en dos: los elegantes y afeminados eloi, de infantil indolencia, que viven placenteramente en la superficie, y los oprimidos y peligrosos morlocks, que viven medio ciegos y descoloridos entre las máquinas subterráneas que mantienen esta alegre civilización. La obra se mueve a través de una serie de interpretaciones del narrador que, a medida que avanza la novela, van siendo reemplaza-

das por un conocimiento cada vez más sardónico y amenazador. Al principio, sólo le decepciona la falta de progreso intelectual que encuentra:

> Yo siempre había esperado que las personas del año 802.000 y tantos nos adelantarían increíblemente en conocimientos, arte, en todo. Y, de pronto, uno de ellos me hacía una pregunta que evidenciaba que su nivel intelectual era el de un niño de cinco años.
>
> (*La máquina del tiempo*, pág. 25)

Luego lo relaciona con el peligro de revolución por parle de los oprimidos: las «elegantes criaturas del Mundo Superior no eran los únicos descendientes de nuestra generación, sino que aquel Ser, pálido, repugnante, nocturno… era también nuestro remoto heredero» (*ibíd.*, pág. 47). Al final advierte un equilibrio de opresión y terror entre las dos especies. Los elegantes eloi son carne para los morlock, que los capturan al amparo de la noche y los consumen bajo tierra. ¿Serán, acaso, un tipo de ganado en vez de unos estetas? Ambas especies están comprometidas en este equilibrio cerrado. Tampoco existe versatilidad, el rasgo característico del ser humano y del potencial evolutivo: «Una ley natural que olvidamos es que la versatilidad intelectual es la compensación por el cambio, el peligro y la inquietud. Un animal en perfecta armonía con su entorno es un puro mecanismo. La naturaleza nunca apela a la inteligencia, a no ser que el hábito y el instinto dejen de ser útiles. No hay inteligencia donde no hay cambio» (*ibíd.*, pág. 78-79). En la última sección del libro esta inmutabilidad toma una forma más extrema, que remite directamente al reconocimiento huxleyano de que la evolución no tiene por qué implicar progreso, y a la angustiosa conciencia de Darwin de que la energía, en vez de acumular más potencial, se está agotando.

> Viajé así, deteniéndome de vez en cuando, a grandes zancadas de mil años o más, arrastrado por el misterioso destino de la tierra, viendo con extraña fasci-

nación cómo el sol se volvía más grande y mortecino en el cielo de occidente y la vida de la vieja tierra iba decayendo.

(*Ibíd.*, pág. 85)

Aparece aquí el típico temor Victoriano, anterior al descubrimiento de la radiactividad, acerca de la muerte del Sol y la actuación de la segunda ley de la termodinámica. *Ésta* es la contradicción clave de la época: entre la expectativa evolutiva de un futuro más refinado y energético, perfeccionado por la selección natural, y la pérdida de energía disponible a causa del aumento de entropía hasta que la tierra llega al equilibrio, a la gran quietud, la muerte universal.

Novelas de primates

Para los novelistas del cambio de siglo, la naturaleza de la especie humana y su parentesco con los demás primates también se convierte en el foco de una agradable ansiedad. Jack London, por ejemplo, crea en *Antes de Adán* un narrador en primera persona cuya infancia reside la mitad del tiempo en pleno Pleistoceno, compartiendo con sus remotos padres primates la emoción dominante del miedo. Se sugiere que el niño ha accedido a «memorias raciales». Cuando acude al colegio encuentra explicación a sus sueños:

> Pero en el colegio descubrí la evolución y la psicología, y conocí la explicación de varias experiencias y estados mentales extraños. Por ejemplo, el sueño de caer en el espacio es la experiencia soñada más común, conocida de primera mano por prácticamente todos los hombres. Se trata de una memoria racial, me explicó mi profesor, y se remonta a nuestros remotos antepasados, que vivían en los árboles.

(*Antes de Adán*, págs. 20-21)

El tema de la especiación también puede usarse como excusa para examinar cuestiones de clase social o etnicidad. Un ejemplo convincente es el siempre popular *Tarzán de los monos*, escrito en

1888 y publicado en 1917. En la historia de Burroughs, una pareja de jóvenes aristócratas muere en la jungla y su hijo es adoptado por unos monos. Crece entre ellos como Tarzán y se convierte en su líder (lo mismo hace Mowgli en *El libro de la selva*, escrito por Rudyard Kipling en 1894; ambos implican un subtexto colonizador). Al final del libro queda autentificado el linaje aristocrático, no simiesco, de Tarzán. Esto se logra mediante una paradoja que sólo el lector puede apreciar. Compartimos su caballeresca reticencia. Tarzán, cuyo amor por Jane es correspondido, se encuentra con el novio de ella. El joven le pregunta sobre su familia:

> «Si no le importuno, ¿puede decirme de qué condenada manera llegó usted a esa maldita jungla?». «Nací allí», dijo Tarzán con calma. «Mi madre era una mona y, por supuesto, no me habló mucho de ello. Nunca supe quién fue mi padre».
>
> (*Tarzán de los monos*, pág. 269)

Una hábil vuelta de tuerca: al manifestar que sus padres adoptivos son su verdadero linaje, Tarzán demuestra su caballerosidad aristocrática. Jane se casa con su novio. Tarzán se retira con caballerosa abnegación.

Los temas darwinistas y sus contradictorias implicaciones, así como sus problemáticas relaciones con otras grandes teorías, no han desaparecido de la ficción. *A Change of Climate* (1994), de Hilary Mantel, entreteje temas evolutivos en una novela cuyo epígrafe, tomado de *El origen del hombre*, expresa tanto la afirmación darwinista de neutralidad como la ansiedad por la descripción, tal vez por la invención, que comparten tanto el científico como la novelista: «No nos preocupan las esperanzas ni los miedos, sino tan solo la verdad hasta donde nuestra razón nos permita descubrirla. He dado a las pruebas lo mejor de mi habilidad…». Mantel añade a este pasaje otra cita, tomada de Job (IV, 7), que pone en tela de juicio el anterior: «Así pues, ¿los inocen-

tes siempre perecen? ¿Los justos fueron destruidos?». El libro pone en duda a su vez esta declaración; demuestra con ánimo agotador, como haría Darwin, que es necesario decir la verdad para mostrar que los inocentes perecen y los justos son destruidos.

En una brillante novela tragicómica llamada *Monkey's Uncle*, también publicada en 1994, Jenny Disky conecta las ideas evolutivas con la teoría del caos. Ninguna de ellas se expresa de una manera que resulte satisfactoria para un técnico escrupuloso, pero explora, empleando el modelo de *Alicia* y el de las biografías, la forma en que cada uno de nosotros está marcado por las ideas que han compuesto nuestra cultura común.

A medida que su protagonista, Charlotte FitzRoy, se hunde en la locura, se encuentra compartiendo su desesperación con el capitán FitzRoy del *Beagle*, una congoja que el lector actual relacionará con un ejemplo (el litoral infinito) tomado del libro del matemático Benoît Mandelbrot *La geometría fractal de la naturaleza* (1982). La tarea profesional de FitzRoy es vigilar las costas y las orillas; para vivir necesita creer, como cristiano devoto, en un patrón controlable para su cometido y su existencia. Pero, a medida que se aproxima a la orilla, «la simplicidad aparente se alteraba». Las líneas suaves se vuelven «cada vez más complejas y tortuosas»:

> FitzRoy deseaba la simplicidad ardientemente, de todo corazón, pero su mente estaba comprometida con la precisión. Y, *precisamente*, la línea que podría haber reproducido con una simple mirada resultó no existir como algo continuo, se volvió intrincada…
>
> La obvia concavidad de una ensenada se convirtió en una multitud de entrantes y salientes, estableciendo al acercarse, dentro de la forma mayor y más simple, los contornos de las muchas formaciones rocosas de la que estaba formada. Entonces, al acercarse a aguas menos profundas, aparecía a la vista la miríada de guijarros individuales de la orilla y se hundía toda idea posible de simplicidad. Al final, caminando por el agua hasta tierra, aporreándose el corazón, con la desesperación golpeando secamente su cabeza, FitzRoy hundió sus rodillas en la playa, para alarma de sus hombres, y examinó los guijarros e in-

cluso los granos de arena. Cada una de estas menudas piedrecillas también tenía un contorno, por supuesto, y había tantos, demasiados para albergar cualquier esperanza de describir el patrón que formaban.

(*Monkey's Uncle*, pág. 22)

Aunque FitzRoy se lleva mal con Darwin y sus teorías le parecen repudiables, su desesperación surge de esta reflexión silenciosa y aislada: la multiplicidad de estructuras y de escalas provoca la ausencia de estructura. El reparto de la ficción de Disky incluye a Jenny, el orangután «Darwin», los fueguinos Jemmy Burton y Fuegia Basket, que son devueltos a su tierra por FitzRoy y Darwin, y tres viejos caballeros del siglo XIX: Marx, Freud y el propio Darwin, condenados a consolarse durante toda la eternidad con frecuentes meriendas campestres y conversaciones irascibles. Esta novela, tributo y sátira, es un animado funeral por los perdidos determinismos de los tres sistemas de pensamiento confrontados e imbricados en los cuales han crecido las generaciones europeas recientes. La cómica melancolía del cuento de Disky es una elegía por estos seguros reduccionismos.

No obstante, espero haber demostrado que la obra de Darwin siempre se sacude de encima el reduccionismo. «Se suele hablar del maravilloso suceso de la aparición del hombre intelectual; la aparición de insectos con otros sentidos es más maravillosa», escribió el joven Darwin en su cuaderno de notas, fascinado como siempre por la diversidad, por lo otro, por el mundo sin (o aparte de) la humanidad. Lo que para otros parece suplementario, para él es central. Siempre deja algo para pensar a favor o en contra, un reto para los novelistas que insisten repetidamente, correctamente, en volver a llevar al ser humano más allá de la línea del horizonte.

BIBLIOGRAFÍA

Beer, G. (ed.), *Autobiographies of Charles Darwin and T. H. Huxley*, Oxford University Press, Oxford, 1974.

Beer, C., «The death of the sun: Victorian solar physics and the solar myth», En B. Bullen (ed.), *The Sun is God: Painting, Literature and Mythology in the Nineteenth Century*, Oxford University Press, Oxford, 1989, págs. 159-180.

Borges, J. L., «The first Wells», en *Other Inquisitions*, 1937-1952, págs. 86-88, Souvenir Press, Londres, 1973. [*Otras inquisiciones*, Alianza Editorial, Madrid, 2000.]

Borges, J. L., «Pierre Menard, Author of Don Quixote», en *Ficciones* introducción de John Sturrock, Everyman, Londres, 1993, págs. 29-38. [*Ficciones*, Alianza Editorial, Madrid, 2001.]

Browne, J. y M. Neve (eds.), *The Voyage of the Beagle*, por Charles Darwin (primera edición de 1839), Londres, 1989.

Burckhardt, F. y S. Smith (eds.), *Correspondence of Charles Darwin*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.

Burroughs, E. R., *Tarzan of the Apes*, Macmillan, Londres, 1917. [Trad. esp.: *Tarzán de los monos*, Edhasa, Barcelona, 1995.]

Campbell Ross I. (ed.), *The Life and Opinions of Tristram Shandy*, de L. Sterne, vol. V (primera edición de 1761), Oxford University Press, Oxford, 1983. [Trad. esp.: *Vida y opiniones del caballero Tristram Shandy*, Alfaguara, Madrid, 2000.]

Darwin, C., *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*, Londres, 1871.

Dish, J., *Monkey's Uncle*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1994. Huxley, T. H., «The struggle for existence in human society», en *Evolution and Ethics* (ensayo publicado por vez primera en 1888), págs. 195-236, Macmillan, Londres, 1906.

Keymer, T., *Richardson's Clarissa and the Eighteenth Century Reader*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

London, J., *Before Adam*, Londres, s. d. [Trad. esp.: *Antes de Adán*, Miraguano, Madrid, 1986.]

Moorcock, M. (ed.), *The Time Machine*, por H. G. Wells (primera edición de 1896), Londres, 1994.

Peckham, M. (ed.), *The Origin of Species by Charles Darwin: A Variorum Text*, Filadelfia, 1959.

Ryazanskaya, S. (ed.), *Marx-Engels Selected Correspondence*, Moscú, 1965.

La evolución de la ciencia

Freeman Dyson

FREEMAN DYSON, miembro de la Royal Society, es catedrático emérito de Física en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Sus trabajos de investigación abarcan muchos campos, desde la matemática pura hasta la física de partículas y la ingeniería nuclear. Su contribución más importante ha sido la interpretación de la electrodinámica cuántica, la teoría física que describe las interacciones entre la materia y los campos electromagnéticos. Ha escrito varios libros de divulgación científica, entre los que se incluyen *Disturbing the Universe*, *Orígenes de la vida*, *El infinito en todas direcciones* (Metatemas 25) y *De Eros a Gaia* (Metatemas 35).

Analogías

Se me ha pedido que escriba sobre la evolución de la ciencia, un tema tan amplio que debería ser historiador para estar a la altura. Pero no lo soy. Sólo soy un científico con tres o cuatro nociones de historia, y prefiero escribir sobre cosas que conozco. En este capítulo no hablaré de la verdad histórica, sino que contaré algunas historias. Escribiré sobre astronomía, que sólo es una pequeña parcela de la ciencia, y sobre algunos sucesos recientes que me son familiares. La historia reciente de la astronomía me servirá para ilustrar algunos temas evolutivos que pueden ser extensibles —o quizá no— a épocas anteriores o a otras áreas de la ciencia.

Mi enfoque de la evolución se basa en algunas analogías entre la biología, la astronomía y la historia. Empiezo con la biología. Los principales agentes de la evolución orgánica son la especiación y la simbiosis, unas palabras habituales en el mundo de la biología. La vida ha evolucionado mediante especiación, un proceso de mejora sucesiva y subdivisión de formas y funciones, que ha sido puntuado por la simbiosis, que funde especies genéticamente distintas en un único organismo. A raíz del trabajo de la bióloga Lynn Margulis y otros precursores, la perspectiva inicialmente herética de que la simbiosis ha sido el mecanismo crucial para la evolución de la vida ha pasado a formar parte de la ortodoxia. Cuando contemplamos la evolución de la vida desde una perspectiva ecológica, y no sólo anatómica, se incrementa la importancia de la simbiosis respecto de la especiación.

Como físico, me sorprende que la apropiación de conceptos de la biología por la astronomía sea válida en dos niveles. Como mostraré a continuación, en el cielo pueden observarse muchas analogías entre los procesos astronómicos y los biológicos. También pueden encontrarse analogías similares entre los procesos intelectuales y los biológicos en la evolución y la taxonomía de las disciplinas científicas. La evolución del universo y la evolución de la ciencia se pueden describir con el mismo lenguaje que la evolución de la vida.

Especiación en los cielos

En el contexto astronómico, la especiación se produce mediante un proceso de transición de fase. Una transición de fase es un cambio súbito en las propiedades físicas o químicas de la materia, que suele producirse mediante un calentamiento o un enfriamiento. La congelación del agua, la magnetización del hierro

y la precipitación de la nieve a partir del vapor de agua atmosférico son algunos ejemplos cotidianos de transiciones de fase. En muchos casos, la fase más caliente es una mezcla uniforme y desordenada, mientras que la fase más fría se divide en dos componentes separados con estructuras más ordenadas. Estas transiciones se denominan transiciones orden-desorden. Un ejemplo típico es la transición de un aire húmedo a un aire seco con copos de nieve; estos copos son especies nuevas, dotadas de una estructura cristalina compleja que no existía en el aire húmedo del que surgieron. Es más, por efecto de la gravedad terrestre, los copos de nieve se separan espontáneamente del aire y caen al suelo. En todas las etapas de la evolución del universo podemos ver transiciones de esta clase: la aparición repentina de estructuras no existentes previamente y la separación física de las estructuras recién creadas en diferentes regiones del espacio.

Las transiciones de fase de un estado desordenado a otro ordenado se conocen también como rupturas de simetría. Desde el punto de vista matemático, una fase desordenada tiene un grado de simetría más elevado que una fase ordenada. Por ejemplo, el entorno de una molécula de agua en un aire húmedo es el mismo en todas direcciones, mientras que el entorno de la misma molécula en un copo de nieve es un cristal regular, con ejes orientados en direcciones definidas. La molécula ve que su entorno cambia desde la simetría máxima de una esfera hasta la simetría menor de un prisma hexagonal. El cambio de un entorno desordenado a otro ordenado está asociado con una pérdida de simetría. A medida que el universo evoluciona, se observa una pérdida repentina de simetría en muchas de las transiciones de fase más importantes.

En las primeras etapas de su historia, el universo era caliente, denso y se expandía rápidamente; la materia y la radiación esta-

ban totalmente desordenadas y mezcladas uniformemente. Una de las rupturas de simetría más importantes fue la separación del universo en dos fases: la primera contenía la mayor parte de la materia, que luego se condensaría en forma de estrellas y galaxias, y la otra contenía la mayor parte de la radiación, que luego se convertiría en el vacío intergaláctico. La separación ocurrió cuando el universo se volvió lo bastante transparente para que grandes pedazos de materia, unidos por su propia gravedad, pudieran radiar su energía gravitatoria al vacío que los rodeaba. Esta transición hizo que el universo perdiera su simetría espacial original: de un espacio uniforme se pasó a un conjunto de masas irregulares. Este proceso de ruptura de simetría se repitió más tarde a escalas cada vez más pequeñas. La primera generación de objetos estaba formada por enormes masas de gas, uniformes y simétricas a escala local. La uniformidad local de este gas desapareció cuando empezó a condensarse para formar los objetos de segunda generación que llamamos galaxias. El gas de cada galaxia se enfrió y se condensó, originando la tercera generación de objetos, las nubes moleculares gigantes. Por último, el gas y el polvo de algunas regiones de las nubes moleculares se condensaron, dando lugar a la cuarta generación de objetos: las estrellas y los planetas. El universo se convirtió en un conjunto jerárquico de masas de distintas formas y tamaños. Cada etapa de la formación de estos objetos masivos fue promovida por la gravedad y asistida por transiciones de fase que permitieron la separación física de la materia y su diferenciación.

El proceso astronómico de especiación no se detuvo tras la formación de las estrellas y planetas. Cuando la Tierra se hubo condensado a partir del polvo interestelar, surgieron nuevas oportunidades para la separación de fases y el crecimiento de estructuras. Primero vino la separación del interior de la Tierra en sus componentes principales: el núcleo, el manto y la corteza.

Luego tuvo lugar la separación de la superficie en tierra, océano y atmósfera. Este proceso aún continúa: el agua circula constantemente del océano a la atmósfera y de ésta a la tierra y al océano. El tercer proceso que transformó la Tierra fue la fragmentación de la corteza y la formación y destrucción de las placas en sus bordes respectivos, en un proceso conocido con el nombre de tectónica de placas. Estos fenómenos generan fuerzas muy intensas, que producen constantemente nuevas estructuras. El cuarto proceso creador de orden y estructura en la Tierra es el más poderoso de todos. Estoy hablando de la vida, que apareció hace entre tres y cuatro mil millones de años y dio un nuevo sentido al concepto de especiación.

La transición de la fase inerte a la viva fue de un nuevo tipo. En este caso la fase ordenada adquirió la capacidad de perpetuarse después de que cambiaran las condiciones que propiciaron la transición. Hay muchas teorías sobre el origen de la vida, pero ninguna de ellas está apoyada por evidencias lo bastante claras para imponerse. Todo lo que podemos asegurar es que una mezcla compleja de materiales orgánicos experimentó una transición a una fase ordenada que podía crecer, replicarse y obtener alimento de su entorno. Una vez establecida, esta fase ordenada se hizo lo bastante flexible para mutar y diversificarse en millones de especies diferentes. La vida ha dado a nuestro planeta una riqueza de estructuras que no observamos en ningún otro lugar del universo. Pero la diversificación de las formas de vida en la Tierra es muy similar en algunos aspectos a la diversificación de las especies celestes (galaxias y nubes de polvo, estrellas y planetas) en el universo antes de que surgiera la vida. La evolución de la vida encaja lógicamente en la evolución del universo. Tanto en el universo inanimado como en la Tierra viva, la evolución alterna periodos largos de metaestabilidad con periodos cortos de cambio rápido. Durante estos últimos, las estructuras antiguas

se vuelven inestables y se dividen en otras nuevas. Durante los periodos de metaestabilidad, estas nuevas estructuras se consolidan, ajustándose y adaptándose a un entorno que parece inmutable. De repente, el medio ambiente cruza cierto umbral que sumerge las estructuras existentes en una nueva inestabilidad y el ciclo de especiación comienza de nuevo.

Simbiosis

Las transiciones de fase constituyen la primera de las dos fuerzas motoras de la evolución. La otra es la simbiosis, es decir, la reunión de dos estructuras que han evolucionado por caminos separados. El resultado es una estructura compuesta con un comportamiento diferente del que tenían los componentes por separado. La simbiosis tuvo un papel fundamental en la evolución de las células eucariotas a partir de las procariotas. Las mitocondrias y los cloroplastos, dos constituyentes fundamentales de las células modernas, fueron en otro tiempo criaturas independientes que invadieron la célula eucariota ancestral y se adaptaron a vivir en su interior. Así, la célula simbiótica adquirió una complejidad estructural y funcional muy superior a la de sus componentes aislados. La simbiosis permite que la evolución avance a pasos agigantados. Una criatura simbiótica puede saltar a un nivel superior de complejidad mucho más deprisa que una criatura que evoluciona mediante los procesos habituales de la mutación y la especiación.

La simbiosis predomina tanto en la biología como en el cielo. Los astrónomos suelen hablar de estrellas simbiontes. La razón básica de la importancia de la simbiosis en astronomía es el doble modo de acción de las fuerzas gravitatorias. Cuando la gravedad actúa sobre una distribución uniforme de materia que ocupa un

gran volumen de espacio, su primer efecto es concentrar la materia en cuerpos separados por espacio vacío. Los cuerpos se diferencian y evolucionan por separado hasta convertirse en especies distintas. Luego, tras un periodo de existencia independiente, la gravedad actúa de nuevo juntando los cuerpos de dos en dos. La formación de pares es un proceso esporádico que depende de encuentros casuales. En general, se necesita mucho tiempo para que dos cuerpos formen un par. Pero el universo dispone de tiempo de sobras. Al cabo de unos pocos miles de millones de años, muchos objetos de todos los tamaños acaban formando sistemas simbiontes, ya sean pares o cúmulos. Una vez ligados por la gravedad, los procesos disipativos los acercan cada vez más. Esto hace que interaccionen con una intensidad cada vez mayor, y que los efectos de la simbiosis resulten más llamativos.

Podemos observar ejemplos de simbiosis astronómica en cualquier parte del firmamento. A grandes escalas, son comunes los pares simbióticos y los cúmulos de galaxias. Cuando dos galaxias entran en contacto, su evolución interna suele modificarse profundamente. La existencia de núcleos galácticos activos, que aparecen en el cielo como fuentes de luz intensa, es un signo corriente de actividad simbiótica. La causa probable de la emisión de luz es la absorción de gas por un agujero negro en el centro de la galaxia debido a perturbaciones gravitatorias producidas por otra galaxia. Las galaxias grandes suelen engullir a las pequeñas. Los núcleos de las galaxias engullidas se observan en su interior, como si fueran huesos de ratón en el estómago de una serpiente. Esta forma de simbiosis se conoce con el nombre de canibalismo galáctico.

En cuanto a las estrellas, podemos distinguir muchos tipos de simbiosis porque hay muchos tipos de estrellas y muchas fases evolutivas para cada estrella del par. Los pares simbióticos más

llamativos son los formados por un componente en un estado muy condensado (una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro) y una estrella normal. Si las dos estrellas giran muy cerca una de otra, el gas de la estrella normal fluye hacia el intenso campo gravitatorio de la estrella condensada. En su caída por este profundo pozo gravitatorio, el gas se calienta mucho y produce efectos inusuales como explosiones recurrentes, emisiones intensas de rayos X y variaciones rápidas de luminosidad. Otros pares simbióticos menos espectaculares y más comunes consisten en estrellas normales que giran una alrededor de otra lo bastante cerca para intercambiar masa.

La clase menos frecuente de pares simbióticos consiste en dos estrellas condensadas. Son observables mediante radiotelescopios si uno de los miembros del par es un púlsar, es decir, una estrella de neutrones que emite pulsos de ondas de radio al girar. Uno de estos pares, una simbiosis de dos estrellas de neutrones, fue descubierto por los astrónomos Joseph Taylor y Russell Hulse, lo que les valió el premio Nobel de física en 1993. La importancia científica de este par simbiótico de estrellas de neutrones estriba en haber proporcionado la primera prueba firme de la existencia de ondas gravitatorias. El arrastre producido por las ondas gravitatorias hace que las estrellas se vayan acercando, hasta que se encuentran tan próximas que entran en un estado de inestabilidad dinámica y se convierten en una única estrella con dos brazos espirales que se llevan la mayor parte del momento angular. El colapso tiene lugar en milésimas de segundo y origina una intensa emisión de rayos gamma. Los detalles del proceso han sido calculados por Fred Rasio, un joven astrónomo del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y podrían explicar las misteriosas emisiones de rayos gamma que se detectan en distintos lugares del firmamento, a razón de una al día, con una distribución espacial aleatoria. (Más adelante comentaré cómo se descubrieron es-

tas emisiones.) Si los cálculos de Fred Rasio son correctos, estaríamos ante los sucesos más violentos de todo el universo, más energéticos que las supernovas de las que surgen las estrellas de neutrones. Un par simbiótico de estrellas de neutrones puede liberar mucha más energía que una sola estrella. La simbiosis adquiere cada vez más protagonismo a medida que el universo evoluciona.

Desde el punto de vista humano, el ejemplo más importante de simbiosis astronómica es la que existe entre la Tierra y el Sol. El sistema formado por el Sol, los planetas y sus satélites es un ejemplo típico de simbiosis astronómica. Durante la formación del sistema solar, el Sol y la Tierra nacieron con diferentes composiciones químicas y distintas propiedades físicas. El Sol estaba formado básicamente por hidrógeno y helio, en tanto que la Tierra estaba formada por elementos más pesados. La física del Sol era simple, consistía en una esfera de gas calentada por la fusión del hidrógeno, que brillaba pausadamente durante miles de millones de años. La Tierra tenía una física compleja; su superficie, en parte líquida y en parte sólida, se transformaba continuamente mediante transiciones de fase. La simbiosis de estos dos mundos tan diferentes hizo posible la aparición de la vida. La Tierra proporcionó una diversidad química y ambiental que la vida podía explorar. El Sol proporcionó estabilidad física y una fuente ininterrumpida de energía. La combinación de la variabilidad de la Tierra con la constancia del Sol proporcionó las condiciones para la evolución y el progreso de la vida.

Herramientas y conceptos

Pasaré ahora de la astronomía a la historia, de la evolución del universo a la evolución de la ciencia. Los sucesos más importan-

tes en la historia de la ciencia suelen llamarse revoluciones científicas, y pueden clasificarse en dos tipos: las revoluciones impulsadas por nuevos conceptos y las impulsadas por nuevas herramientas. Estos cambios son análogos a las revoluciones biológicas impulsadas por la especiación y la simbiosis, o las revoluciones astronómicas impulsadas por las transiciones de fase y las ligaduras gravitatorias. Cuando un nuevo concepto penetra en un campo científico, la revolución se produce desde dentro, a partir de inconsistencias o contradicciones internas, y se traduce en una transición de fase hacia un nuevo paradigma. Cuando un campo científico es invadido por nuevas herramientas, la revolución empieza desde fuera, a partir de instrumentos importados desde otra disciplina, y se traduce en una simbiosis de dos disciplinas. En ambos tipos de revolución, el resultado final es una nueva subdisciplina de la ciencia y una nueva especie de científico, especializado en las nuevas ideas o en las nuevas herramientas según sea el caso.

En su famoso libro *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), Thomas Kuhn habló casi exclusivamente de conceptos y casi nada de herramientas. Su idea de una revolución científica se basaba en un ejemplo singular: la revolución que se produjo en la física teórica tras el advenimiento de la mecánica cuántica en los años veinte. Éste era un buen ejemplo de revolución impulsada por conceptos, y el libro de Kuhn estaba tan bien escrito que enseguida se convirtió en un clásico que extravió a toda una generación de estudiantes e historiadores de la ciencia, a quienes hizo creer que todas las revoluciones científicas están impulsadas por conceptos. Las revoluciones conceptuales son las que más atraen la atención y tienen un mayor impacto en la percepción pública de la ciencia, pero son poco frecuentes en comparación con las impulsadas por herramientas. Además de la revolución mecanocuántica que Kuhn adoptó como modelo, en los últimos

500 años se han producido cinco importantes revoluciones conceptuales, que se asocian respectivamente a los nombres de Copérnico, Newton, Darwin, Einstein y Freud. Durante este mismo periodo han tenido lugar unas veintidós revoluciones impulsadas por herramientas, quizá no tan llamativas a los ojos del gran público, pero igual de importantes para el progreso de la ciencia. No las enumeraré todas. Dos buenos ejemplos son la revolución galileana, producto del uso del telescopio en astronomía, y la revolución de Watson y Crick, derivada del empleo de la técnica de difracción de rayos X para determinar la estructura de macromoléculas orgánicas. Galileo introdujo en la astronomía una herramienta que tomó prestada de la óptica. James Watson y Francis Crick introdujeron en la biología herramientas que tomaron prestadas de la física. Las revoluciones conceptuales explican hechos conocidos de otra manera. Las revoluciones impulsadas por herramientas descubren hechos nuevos que requieren explicación. En astronomía han predominado las revoluciones impulsadas por herramientas. Hemos tenido más éxito a la hora de descubrir cosas que a la hora de explicarlas.

Hasta aquí he hablado de generalidades; pero me interesan más los detalles de ciertas revoluciones científicas que las reglas generales que puedan (o no) extraerse de ellas. Los detalles son reales, mientras que las reglas generales son sólo aproximaciones a la realidad y, en el peor de los casos, espejismos. En el siglo XIX hubo varias revoluciones impulsadas por herramientas en astronomía. Una fue la introducción de la espectroscopia de alta resolución por parte de Joseph von Fraunhofer, que permitió a los astrónomos estudiar la composición química del Sol y las estrellas. Otra fue la introducción de la fotografía astronómica de larga exposición a cargo de Henry Draper y James Keeler, que permitió estudiar objetos miles de veces más débiles que los discer-

nibles por el ojo humano. En ambos casos, la comunidad de astrónomos absorbió tecnologías ajenas con diferentes tradiciones. Fraunhofer venía del mundo de la fabricación comercial de lentes, y la fotografía abrió las puertas de los observatorios a expertos en el oficio del retrato de estudio. La simbiosis de los observadores del cielo con estas dos tradiciones ajenas dio lugar a la astrofísica, una nueva ciencia que intenta describir de forma cuantitativa los procesos físicos que tienen lugar en las estrellas y otros cuerpos celestes.

Bernhard Schmidt y Fritz Zwicky

Pasemos ahora a las revoluciones del siglo XX. La primera se asocia a los nombres de Bernhard Schmidt, que inventó una nueva clase de telescopio, y Fritz Zwicky, que le encontró uso. Ambos eran personajes bastante heterodoxos. Schmidt era un técnico en óptica que pasó su infancia en una pequeña isla del mar Báltico. De niño experimentaba con explosivos caseros hasta que, con doce años, se voló la mano derecha, después de lo cual aprendió de forma autodidacta el arte de fabricar telescopios con la mano izquierda. Se ganaba la vida vendiendo espejos de gran calidad a astrónomos aficionados y observatorios profesionales de toda Europa. En 1932 construyó en Hamburgo el primer «telescopio Schmidt». Éste era un instrumento revolucionario que permitía obtener imágenes de gran nitidez con un campo visual cientos de veces mayor que el de los telescopios convencionales. Por vez primera era posible obtener fotografías nítidas de grandes áreas del cielo de manera rápida y práctica, lo que permitió fotografiar todo el firmamento en un tiempo y con un coste razonables. Schmidt era hombre de pocas palabras: sus obras completas ocupan tres páginas.

El joven físico suizo Fritz Zwicky trabajaba en el Instituto Tecnológico de California cuando Schmidt inventó su telescopio. Zwicky se interesaba por las supernovas, estrellas que, de forma esporádica, brillan en el cielo durante unas pocas semanas con una intensidad extraordinaria. Hasta entonces se habían visto muy pocas supernovas. Tycho Brahe observó una y Kepler otra más antes de que hubiera telescopios, pero no estaba claro que fueran diferentes de las novas ordinarias. Zwicky fue uno de los pocos que se interesó seriamente por este fenómeno, y supo ver antes que nadie que se trataba de eventos catastróficos a una escala mucho mayor que la de las novas ordinarias. Comprendió que una supernova era un suceso enormemente violento, que probablemente acarreaba la disgregación de la estrella. Zwicky tenía claro que para entender mejor el fenómeno era necesario observar una amplia muestra de supernovas y no sólo una o dos, y que el telescopio de Schmidt era la herramienta que necesitaba, la única que le permitiría detectar un número razonable de supernovas y estudiarlas de forma sistemática.

Treinta años después, Zwicky escribió una autobiografía titulada *Discovery, Invention, Research trough the Morphological Approach*. Creía apasionadamente en una teoría personal que aplicaba a todo, que llamaba el «método morfológico». La idea básica consiste en escribir una lista completa de todas las maneras concebibles de solucionar un problema antes de elegir la buena. Si juzgamos el método de Zwicky por la cantidad de descubrimientos importantes que hizo, tenemos que concluir que es muy efectivo. Su desventaja es que no parece funcionar tan bien cuando lo aplica otra persona.

He aquí la descripción de Zwicky, extraída de su autobiografía, de cómo utilizó el enfoque morfológico para estudiar las supernovas.

> Me gustaría advertir a los impetuosos que no es recomendable querer hacer todo al mismo tiempo, un error que suelen cometer los individuos y las instituciones cuyos fondos son limitados. Por ejemplo, la construcción de telescopios multiuso no es recomendable en general. Es mejor concentrar la atención en problemas concretos y construir instrumentos específicos para su solución. Luego se suele descubrir que estos instrumentos también se pueden usar para otros propósitos. Como ejemplo mencionaré el telescopio Schmidt de Monte Palomar, cuya construcción impulsé en 1935 para la tarea concreta de observar supernovas… Puse a punto este instrumento en la noche del 5 de septiembre de 1936 y enseguida empecé a estudiar varios miles de galaxias.

Tan pronto como Zwicky supo del invento de Schmidt, movió cielo y tierra, con la ayuda entusiasta de George Hale, para adquirir un telescopio Schmidt de 18 pulgadas e instalarlo en la cúpula del observatorio de Monte Palomar, la misma que después albergaría el telescopio de 200 pulgadas. El pequeño «Schmidt» de Zwicky fue el primer telescopio de Monte Palomar y el primer telescopio Schmidt del mundo que se instaló en un lugar con cielos despejados y buena visibilidad. De hecho, aún sigue allí y aún se utiliza para investigaciones importantes. Zwicky lo tenía para él solo, cosa que consideraba esencial para realizar un trabajo serio en astronomía. Tenía un único asistente con dedicación exclusiva. Su programa de investigación se convirtió en prototipo de todos los estudios astronómicos posteriores llevados a cabo con grandes instrumentos y mayores presupuestos. Zwycky sabía que, para detectar sucesos esporádicos, tenía que examinar todo el cielo repetidamente, una y otra vez. Durante cinco años, noche tras noche, Zwycky y su ayudante Johnson fotografiaron extensiones enormes del firmamento del hemisferio boreal. Observaron 50.000 galaxias y 10.000 cúmulos de galaxias, que luego compilaron en un catálogo. Cada tres meses, más o menos, comparaban la imagen de cada galaxia con las que habían obtenido previamente. De este modo encontraron nuevas manchas brillantes, que identificaron como supernovas. A continuación, las candidatas a supernova se estudiaban en detalle y su

espectro se analizaba con telescopios mayores. Trabajando de esta guisa durante cinco años, de 1936 a 1941, Zwicky y Jonhson descubrieron veinte supernovas. A partir de esta muestra, Zwicky pudo calcular aproximadamente la frecuencia de aparición de supernovas en el universo, determinó su luminosidad absoluta e identificó dos tipos principales de supernova. De repente, las supernovas pasaron de los límites oscuros de la astronomía a ocupar una posición central y bien visible.

Las consecuencias de la revolución de Schmidt y Zwicky trascendieron sus descubrimientos iniciales. De hecho, provocaron un gran cambio en nuestra percepción global del universo. La antigua perspectiva aristotélica de la esfera celeste como lugar de paz y armonía perfectas había sobrevivido intacta a las revoluciones intelectuales que asociamos con los nombres de Copérnico, Newton y Einstein, y había dominado la práctica astronómica hasta 1935. Zwicky fue el primer astrónomo que imaginó un universo violento. Eligió estudiar las supernovas porque proporcionaban la prueba más directa de procesos explosivos a escala cósmica. A partir de 1935, la idea de un universo dominado por este tipo de fenómenos fue ganando aceptación hasta que, treinta años después, fue confirmada por los espectaculares descubrimientos de los radioastrónomos y los astrónomos de rayos X. Hoy en día damos por sentado que vivimos en un universo violento, pero esto no fue evidente hasta el año 1935, gracias al pequeño telescopio Schmidt de Monte Palomar.

Hotel Vela

Veinte años después de la revolución de Schmidt y Zwicky hubo otras dos revoluciones impulsadas por herramientas, dos simbiosis de la astronomía tradicional con tecnologías ajenas.

Primero vinieron los radiotelescopios, y después los telescopios de rayos X. No me entretendré en las revoluciones de la radioastronomía y la astronomía de rayos X porque su historia es bien conocida y no tengo nada nuevo que decir. En vez de eso consideraré otra revolución, la de los rayos gamma, la que treinta años más tarde motivó el lanzamiento del Observatorio Compton de Rayos Gamma que gira ahora sobre nuestras cabezas.

Pocos años antes de la revolución de los rayos gamma, Zwicky había sentenciado que no hay que construir telescopios multiuso, sino concentrar la atención en problemas específicos y construir instrumentos ex profeso; también había dicho que era muy probable que un instrumento construido con un propósito concreto tuviera aplicaciones inesperadas posteriormente. La revolución de los rayos gamma confirma la regla de Zwicky. Todo empezó en el Laboratorio Nacional de Los Álamos con un proyecto llamado Hotel Vela, concebido para verificar el cumplimiento del Tratado para la Limitación de Pruebas Nucleares de 1963. Hotel Vela desplegó satélites en órbitas muy alejadas de la geosincronicidad, que incorporaban, entre otras cosas, detectores de rayos gamma sensibles a explosiones nucleares en el espacio o en las capas superiores de la atmósfera terrestre. Los detectores de rayos gamma nunca captaron pruebas nucleares pero, como había conjeturado Zwicky, resultaron adecuados para detectar sucesos naturales de un tipo inesperado. En particular, detectaron estallidos de rayos gamma de fuentes desconocidas, independientes de cualquier actividad humana o cualquier objeto astronómico conocido. A raíz de esto, parte de la tradición armamentista de Los Alamos fue absorbida por la pacífica tradición astronómica.

Los astrofísicos R. W. Klebesadel, I. B. Strong y R. A. Olson anunciaron el primer descubrimiento de estallidos de rayos gam-

ma en 1973. Tras describir los detectores Hotel Vela, afirmaban que «sus capacidades proporcionan una cobertura continua en el tiempo que, combinada con una respuesta isótropa, es idónea para la astronomía observacional». Una afirmación inmodesta, pero cierta. Hasta entonces, ningún instrumento astronómico había sido capaz de detectar señales las veinticuatro horas del día en todo el firmamento. Los detectores Hotel Vela tenían otras tres ventajas sobre instrumentos anteriores: registraban sucesos con gran resolución temporal, los localizaban en el tiempo de forma precisa y disponían de cuatro detectores independientes en puntos bien separados del espacio. Estas características permitían situar en el firmamento la mayoría de los sucesos observados con una precisión razonable. Las prestaciones de los instrumentos del proyecto Hotel Vela eran una consecuencia natural de las necesidades en el campo de las armas nucleares. La cultura astronómica anterior al proyecto Hotel Vela nunca las había demandado.

Recuerdo muy bien una visita a Los Alamos en la que Ian Strong me comentó que Hotel Vela había encontrado indicios de explosiones con intensas emisiones de rayos gamma. Strong era reacio a publicar los resultados, no tanto porque los datos fueran secretos, sino porque parecían demasiado extraños para ser creíbles. El equipo de Los Alamos retrasó cuatro años su publicación. Este retraso es una prueba de que el descubrimiento se consideraba revolucionario. Sus autores pensaban que sus datos serían más creíbles si asociaban algunas de estas fuentes de rayos gamma con objetos inusuales, pero observables en radiofrecuencias o longitudes de onda visibles. A pesar de sus esfuerzos, no consiguieron identificarlos de manera convincente hasta diez años después. Como suele suceder cuando se abre una nueva ventana al universo, la imagen era tan extraña que publicarla requirió un gran coraje.

El que los satélites Hotel Vela tuvieran la capacidad de detectar fuentes de rayos gamma fue un accidente afortunado. Tenían órbitas altas, sensibilidad continua en todo el cielo y varios detectores ampliamente separados en el espacio. Por desgracia, el Observatorio Compton de Rayos Gamma tuvo que renunciar a todas estas ventajas a causa de las limitaciones impuestas por la utilización de la lanzadera espacial. Este satélite tiene una órbita baja, por lo que casi la mitad de su campo de visión queda tapado por la Tierra y no es capaz de medir con precisión la dirección de las fuentes por triangulación. Su diseño como observatorio de propósito general viola la regla de Zwicky. Esperemos que las generaciones futuras de detectores de explosiones de rayos gamma incorporen instrumentos con objetivos específicos y aprovechen completamente las ventajas de la arquitectura Hotel Vela. Esta revolución no se completará hasta que se estudien sucesos esporádicos en otras partes del espectro electromagnético. Deberíamos utilizar la arquitectura Hotel Vela con detectores de luz visible, infrarroja, ultravioleta y rayos X, desplegando pequeños satélites en órbitas altas que permitan efectuar triangulaciones. Estos satélites estarían asociados a detectores terrestres que rastrearían fenómenos esporádicos en otros canales, como las ondas de radio, los neutrinos y las ondas gravitatorias. A la revolución Hotel Vela le queda todavía un largo camino por recorrer.

Astronomía digital

La revolución que sigue a la Hotel Vela es la revolución digital. En realidad, es una revolución que aún está en marcha. Ha sido impulsada por otro instrumento de observación, conocido popularmente como cámara CCD. También fue predicha por Fritz Zwicky. Citaré un fragmento de la conferencia Halley de

1948, impartida por Zwicky en la Universidad de Oxford con el título «Astronomía morfológica» (páginas 126-127). Para abreviar he omitido algunas frases y expresiones, pero no he añadido ninguna palabra.

> El telescopio fotoelectrónico introduce las siguientes novedades. (1) Los electrones se aceleran desde la superficie de la imagen hasta la superficie de detección y la potencia eléctrica aplicada al telescopio puede aumentar la intensidad de las señales… (2) El fondo uniforme de luz… puede eliminarse mediante compensación eléctrica… de forma que el cielo de fondo se borre… (3) Aunque la imagen original se mueva, baile o parpadee… a causa de inestabilidades atmosféricas, la imagen reenfocada en la superficie de detección puede fijarse… (4) Zworykin ya ha construido un estabilizador de este tipo… (5) Las imágenes de los telescopios fotoelectrónicos pueden televisarse, y la búsqueda de imágenes de novas, supernovas, estrellas variables, cometas, meteoros y otros objetos astronómicos puede realizarse a gran escala.

Por aquel entonces Zwicky esperaba que todas estas mejoras podrían conseguirse con una cámara de televisión que estaba desarrollando con su amigo Vladimir Zworykin en la RCA (Radio Corporation of America). Zworykin era vecino mío en Princeton, un gran ingeniero y un gruñón, casi tan excéntrico como Zwicky. La cámara de la RCA no respondió a las esperanzas de Zwicky. El sistema fracasó fundamentalmente porque dependía de placas fotográficas para el registro de las imágenes. El éxito de las CCD estriba en que las imágenes no se registran en una placa, sino en una memoria digital. La revolución de la astronomía digital tuvo que esperar hasta la aparición de microprocesadores potentes y memorias digitales capaces de soportar el volumen de datos necesario para el procesamiento de las imágenes.

La revolución digital en astronomía va ahora viento en popa. La astronomía actual es el resultado de la simbiosis íntima de tres culturas: la vieja tradición de los telescopios ópticos, la nueva tradición de la electrónica y la tradición aún más joven de la informática. Uno de los resultados de esta simbiosis es el Sloan Digital Sky Survey (SDSS), un proyecto en el que están implicados

muchos de mis colegas de Princeton. El SDSS es una versión actual de la cartografía del cielo del hemisferio norte que se realizó en Monte Palomar en 1956 y proporcionó a los astrónomos el primer mapa preciso a gran escala del universo. Las placas del observatorio de Monte Palomar han sido muy útiles, pero ya es tiempo de sustituirlas por algo mejor. El resultado del SDSS consistirá en un preciso mapa fotométrico del universo en cinco colores, además de una colección de espectros que proporcionará los corrimientos al rojo de cerca de un millón de galaxias y otros objetos interesantes. Este esfuerzo tendrá como resultado colateral la elaboración de un catálogo de cerca de 100.000 cuásares, lentes gravitatorias, enanas marrones y otros objetos peculiares, que proporcionará una lista completa de los objetos en cada categoría por debajo de cierta magnitud límite.[8] El resultado de este estudio se transmitirá electrónicamente a cualquier centro astronómico que posea suficiente memoria para almacenarlo. El volumen de datos se medirá en decenas de terabytes (un terabyte es un millón de megabytes). Los ordenadores que no dispongan de esta memoria pantagruélica podrán conseguir versiones predigeridas del resultado, con los datos fotométricos comprimidos en catálogos estelares y catálogos de galaxias, a los que se añadirán imágenes de áreas locales especialmente interesantes. La diferencia básica entre SDSS y los estudios previos es que el resultado será lineal y consistirá en intensidades luminosas medidas directamente, y no a partir de una placa fotográfica. Los datos se almacenarán de forma que puedan aplicarse todos los trucos del proceso de datos moderno.

El SDSS es un proyecto en el que colaboran otros seis socios además de Princeton. Utiliza un nuevo telescopio con un campo de 2,5 metros de abertura, construido en Nuevo México, que se dedicará al proyecto durante cinco años. Si todo va bien, el estudio acabará en el año 2002. El plano focal del telescopio alberga

una gran matriz de detectores CCD. Los componentes materiales del proyecto no aportan innovaciones en cuanto al diseño de telescopios o detectores; la novedad principal es el *software* que controla la secuencia de operaciones, calibra los detectores CCD, inspecciona el cielo y aplica diferentes niveles de compresión de datos al resultado antes de distribuirlo a los usuarios. La mayor parte del coste del proyecto corre a cargo de la Fundación Sloan, que sigue el buen ejemplo de la National Geografical Society, que financió el estudio de Monte Palomar hace cincuenta años. El coste total estimado es de unos 50 millones de dólares, lo que incluye una gran inversión en el telescopio. No obstante, esto es más o menos la mitad de lo que vale un gran telescopio terrestre y treinta veces menos de lo que costó el Telescopio Espacial Hubble.

Cuando finalice nuestro pequeño estudio digital del cielo, habrá otros estudios que almacenarán digitalmente mapas del universo cada vez mayores y más detallados. Hay muchos caminos que explorar. Uno podría apuntar hacia objetos más tenues y distantes, otro hacia mayores resoluciones angulares, otro hacia una gama más amplia de longitudes de onda, otro hacia mayores resoluciones espectrales. La revolución de la astronomía digital continuará proporcionando visiones más claras y más amplias de la estructura a gran escala del universo. No hay límite natural al crecimiento de las investigaciones digitales hasta que todos los fotones procedentes del cielo se procesen por separado y se registren la longitud de onda y la polarización de cada uno de ellos.

Por último, me gustaría referirme a la ciencia espacial. En este campo, más que en la astronomía de superficie, la revolución digital ha creado grandes posibilidades aún no completamente explotadas. Las misiones espaciales a gran escala, como las exploraciones de los planetas exteriores por las sondas Voyager y las ob-

servaciones de galaxias lejanas por el Telescopio Espacial Hubble, han incrementado sobremanera nuestro conocimiento. Pero el coste de estas misiones es desproporcionado en relación a su valor científico. Desde este punto de vista, ni los Voyager ni el Hubble han sido rentables. Ambas misiones se lanzaron en un clima político que los valoraba como símbolos de gloria nacionalista más que como instrumentos científicos. En la actualidad, las tendencias políticas se mueven en sentido contrario y los científicos del espacio son muy conscientes de que los tiempos han cambiado. Ya no están de moda las misiones de miles de millones de dólares. En el futuro la financiación será arriesgada. Las misiones pequeñas y baratas son las que tendrán más oportunidades de despegar.

En el año 1995 pasé algunas semanas en el Jet Propulsión Laboratory de Pasadena, que construyó y controló las misiones Voyager. Es la división más imaginativa e independiente de la NASA. Yo estaba particularmente interesado en dos propuestas de misiones planetarias que el JPL quería enviar: el Pluto Fast Flyby (sobrevuelo rápido de Plutón) y el Kuiper Express. El PFF completaría la exploración de los planetas exteriores del Voyager tomando fotografías de alta resolución de Plutón y su satélite Caronte. El Kuiper Express exploraría el cinturón de Kuiper de objetos planetarios recién descubiertos más allá de la órbita de Plutón. Ambas misiones partían de una disminución radical del tamaño de los instrumentos que llevaban los Voyager, conseguida gracias a la revolución digital. Sostengo en mis manos el prototipo del instrumental de las nuevas misiones, que apenas pesa siete kilogramos. Tiene las mismas prestaciones que el instrumental del Voyager, que pesaba media tonelada. Todos los componentes ópticos, mecánicos, estructurales y electrónicos se han reducido drásticamente de tamaño y peso sin sacrificar el rendimiento.

Daniel Goldin, administrador de la NASA, animó al JPL a que diseñara estas nuevas misiones para continuar la exploración del sistema solar exterior con naves espaciales mucho más baratas que el Voyager. Cada misión Voyager costó cerca de mil millones de dólares. Los diseñadores del JPL volvieron a ver a Goldin con su proyecto para el PFF. Su coste estimado era de 700 millones de dólares. Según se cuenta, Goldin dijo: «Lo siento, pero esto no era lo que esperaba» y el proyecto no se aprobó. Su fracaso se debió a que no se alejaba lo suficiente del modelo de los Voyager. El prototipo aún contaba para su suministro eléctrico con el pesado generador termoeléctrico del Voyager, que utilizaba plutonio-238 como fuente de energía, y aún dependía de cohetes químicos pesados para ganar la velocidad necesaria para el largo trayecto de la Tierra a Plutón. Era vino nuevo en una botella vieja, instrumentos nuevos montados en un sistema de propulsión anticuado. Los instrumentos habían disminuido radicalmente de tamaño, pero el resto de la nave no lo había hecho en la misma proporción.

Entre tanto se ha realizado un nuevo diseño, el Pluto Express, que combina partes del viejo PFF y del Kuiper Express. El Pluto Express es vino nuevo en botella nueva. Es la primera nave espacial planetaria radicalmente nueva desde los primeros Pioneer que fueron a Venus. El Pluto Express utiliza propulsión eléctrica solar para alcanzar altas velocidades. Su propelente es xenón, que puede transportarse en forma de líquido supercrítico con la densidad del agua sin necesidad de refrigeración. El prototipo de motor de iones de xenón estaba siendo sometido a pruebas de resistencia en un tanque cuando visité el JPL. Debería funcionar sin fallos y sin pérdida de rendimiento durante dieciocho meses; ésta es una condición previa para que se considere seriamente su utilización en una misión operativa. La fuente de alimentación del prototipo está formada por dos enormes paneles solares muy

ligeros, lo bastante grandes para proporcionar energía a los instrumentos y mantener comunicaciones con la Tierra desde el cinturón de Kuiper, que está muy lejos del Sol. No hará falta ningún generador de plutonio. El Pluto Express se ha librado de la última pieza pesada del Voyager, lo que le permite viajar de forma más rápida y autónoma.

El Pluto Express es una empresa audaz, innovadora en muchos aspectos. Requiere nuevas tecnologías y una nueva forma de administración. Podría fracasar, como ocurrió con el PFF, si sus ingenieros se acobardan y buscan demasiadas soluciones de compromiso. Pero la propulsión eléctrica solar ha abierto la puerta a una nueva generación de pequeñas naves espaciales rentables, que sacan todo el partido de la revolución digital. Si el Pluto Express no consigue despegan lo harán otras misiones más atrevidas. El uso de la propulsión eléctrica solar cambiará la naturaleza y el estilo de las misiones planetarias. Naves impulsadas por paneles solares podrían deambular por el sistema solar, modificando sus trayectorias de vez en cuando en función de las necesidades cambiantes de la ciencia. Esta fuente de energía las haría adaptables, pequeñas y baratas. La nueva generación de naves espaciales evolucionará a partir de los Voyager de la misma manera que los pájaros surgieron de los dinosaurios. En la ciencia espacial, como en la biología evolutiva o la política internacional, el derrumbamiento del viejo orden abre nuevas oportunidades para los espíritus emprendedores.

BIBLIOGRAFÍA

Klebesadel, R. W., I. B. Strong y R. A. Olson, «Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin», *Astrophysical Journal Letters* 182 (1973), L85. (Esta carta anunciaba el descubrimiento de las explosiones de rayos gamma, cuya naturaleza es todavía uno de los grandes misterios de la astronomía.)

Kuhn, T., *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago University Press, Chicago, 1962. Segunda edición. 1970. [Trad. esp.: *La estructura de las revoluciones científicas*, FCE, México, 2000.)

Margulis, L., *Symbiosis in Cell Evolution*, Freeman & Co., San Francisco, 1981. (Ésta es la argumentación clásica en favor de la simbiosis como principio director de la evolución.)

Margulis, L. y M. F. Dolan, «Swimming against the current», *The Sciences* Enero-Febrero (1997), págs. 20-25. (Este breve ensayo describe nuevas evidencias surgidas tras la publicación del libro de Margulis y que amplían el papel evolutivo de la simbiosis.)

Zwicky, F., *Discovery, invention, Research through the Morphological Approach*, MacMillan, Toronto, 1969. (Publicado originalmente en alemán —*Muenchen-Zuerich, Droemersche Verlagsanstalt*, 1966— es una mezcla de autobiografía y ciencia, que muestra tanto la excentricidad como la brillantez de Zwicky.)

Zwicky, F., «Morphological astronomy», *The Observatory* 68 (1948), págs. 121-143. (Ésta fue la conferencia Halley de Zwicky, impartida en Oxford el 12 de mayo de 1948. Es una exposición breve y menos polémica de su filosofía, repleta de ideas interesantes.)

La evolución del universo

Martin Rees

MARTIN REES, miembro de la Royal Society, es catedrático investigador en la Universidad de Cambridge y miembro del King's College. Ha ocupado cátedras en las universidades de Sussex y Cambridge, así como el cargo de director del Instituto de Astronomía de esta última universidad hasta 1992. En la actualidad, Martin Rees es astrónomo real de la Gran Bretaña. Es autor de *Antes del principio* (Metatemas 57).

Los cosmólogos estudian la evolución a la escala más grande de todas. Su objetivo es situar la Tierra y nuestro sistema solar en un esquema evolutivo que se remonte a la formación de la Vía Láctea y más allá, hasta la gran explosión que dio inicio a la expansión de nuestro universo y determinó las leyes físicas que lo gobiernan.

Evolución en el seno de nuestra galaxia

Para empezar, consideraremos un fenómeno bastante conocido: el ciclo vital del Sol, que es una estrella bastante común. Nuestra estrella nació hace unos 4500 millones de años a partir de la condensación de una nube interestelar y luego se comprimió hasta que su núcleo alcanzó una temperatura lo bastante alta para fusionar hidrógeno y formar helio. Este proceso hará que siga emitiendo luz durante otros 5000 millones de años, hasta que el hidrógeno se acabe. Después el Sol se expandirá y engullirá a

los planetas interiores, vaporizando cualquier resto de vida terrestre. Tras esta fase de «gigante roja», el interior del Sol se contraerá y se convertirá en una enana blanca, una estrella compacta del tamaño de la Tierra, pero casi un millón de veces más densa.

Estamos bastante seguros de esta predicción porque su física se ha estudiado concienzudamente en el laboratorio (me refiero a la física atómica y la gravedad newtoniana). Los astrofísicos pueden calcular con la misma facilidad los ciclos vitales de estrellas con la mitad de la masa del Sol o varias veces más pesadas. Las estrellas más masivas arden más y completan antes su ciclo vital.

Las estrellas son tan longevas en comparación con los astrónomos que sólo tenemos acceso a una breve instantánea de sus ciclos vitales. Pero podemos comprobar nuestras teorías observando *poblaciones* de estrellas. Los árboles pueden vivir cientos de años, pero un marciano recién llegado a la Tierra que nunca hubiera visto uno podría deducir su ciclo vital con un simple paseo vespertino por un bosque observando los retoños, ejemplares adultos y algún que otro tronco muerto.

En la Nebulosa de Orión, por ejemplo, se están condensando nuevas estrellas en el interior de brillantes nubes de gas. Los mejores bancos de pruebas para verificar estos cálculos son los cúmulos globulares, unos enjambres de millones de estrellas diferentes, unidas por sus atracciones gravitatorias mutuas y formadas al mismo tiempo.

Pero no todo ocurre tan lentamente en el cosmos; a veces las estrellas tienen un fin catastrófico y explotan en forma de supernovas. La última se observó en 1987. Su incremento repentino de luminosidad y su gradual desvanecimiento fue estudiado no sólo mediante telescopios ópticos (figura 1), sino también con técnicas e instrumentos modernos que han abierto nuevas «ven-

tanas» al universo, como los radiotelescopios y los telescopios de rayos X o rayos gamma.

Dentro de unos 1000 años, los restos de esta supernova tendrán un aspecto parecido al de la Nebulosa del Cangrejo (figura 2), el rescoldo de una supernova observada por astrónomos chinos en el año 1054. En la actualidad, casi un milenio después, los restos de aquella explosión todavía se están expandiendo. La Nebulosa del Cangrejo seguirá expandiéndose y difuminándose gradualmente durante unos cuantos miles de años más; luego se hará tan difusa que se confundirá con el polvo y el gas enrarecido que llenan el espacio interestelar.

Alquimia cósmica

Las supernovas fascinan a los astrónomos, pero ¿por qué deberíamos preocuparnos por la explosión de estrellas que están a miles de años luz de nosotros? Pues porque, de no ser por las supernovas, no habría ni planetas ni (menos todavía) evolución compleja de ningún tipo.

De los noventa y dos elementos químicos naturales, algunos son mucho más comunes que otros. Por cada diez átomos de carbono que contamos hay, en promedio, unos veinte de oxígeno, unos cinco de nitrógeno y otros tantos de hierro. En cambio, el oro es cien millones de veces más escaso que el oxígeno, y otros elementos, como el uranio, son todavía más escasos. ¿Por qué son tan raros el oro y el uranio en comparación con el carbono y el oxígeno? Esta cuestión puede contestarse, pero la respuesta involucra estrellas antiguas que explotaron en nuestra Vía Láctea hace más de 5000 millones de años, antes de que se formara nuestro sistema solar.

Las estrellas mucho más masivas que el Sol tienen una evolución más compleja y espectacular. Cuando agotan el hidrógeno de su núcleo (transformándolo en helio) la gravedad las comprime todavía más. Sus núcleos se calientan aún más, hasta que los átomos de helio se fusionan para producir núcleos de átomos más pesados, como carbono (seis protones), oxígeno (ocho protones) o hierro (26 protones). El núcleo de la estrella se diferencia en capas, como una cebolla; las capas internas, más calientes, producen núcleos atómicos cada vez más pesados.

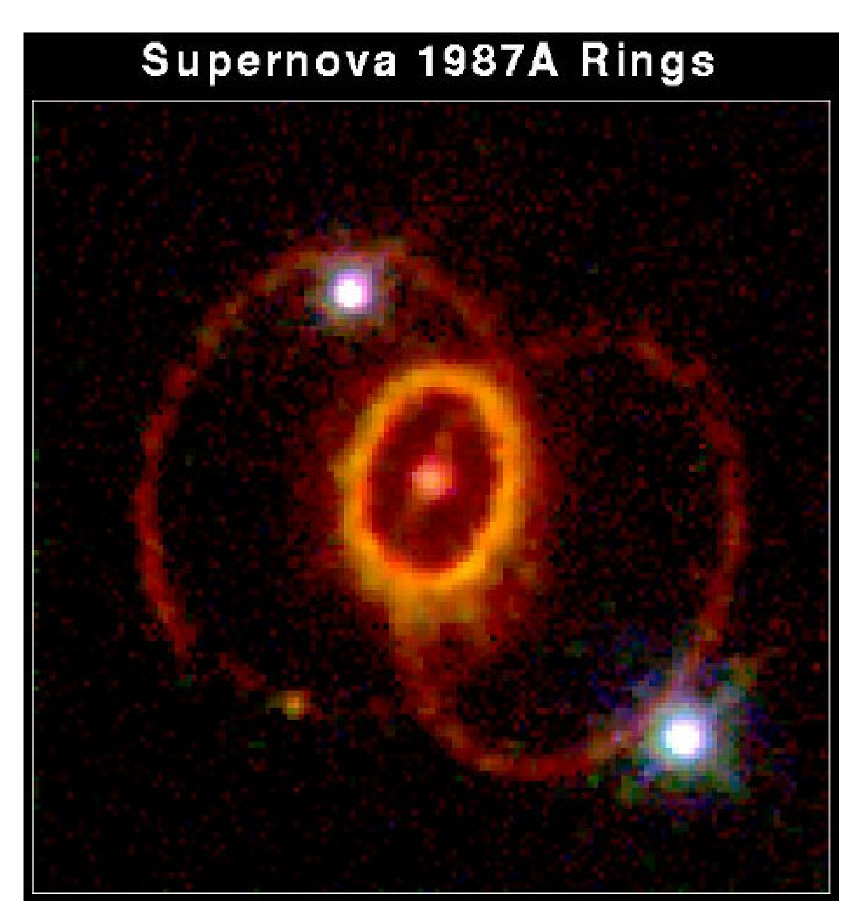


Figura 1. La supernova de la Gran Nube de Magallanes, que está a una distancia de 160.000 años-luz. Esta fotografía, tomada por el telescopio espacial Hubble cinco años después de que se observara la explosión, muestra unos extraños anillos, debidos al parecer a la interacción entre la radiación, los residuos de la explosión y material estelar expulsado probablemente antes de que explotara la estrella.

Cuando el combustible se acaba (en otras palabras, cuando los núcleos se han transmutado totalmente en hierro), las estrellas muy masivas se enfrentan a una crisis. Un hundimiento catastrófico comprime sus núcleos hasta la densidad de los núcleos atómicos, lo que provoca una explosión que dispersa las capas externas. Esta explosión se manifiesta como una supernova parecida a la que creó la Nebulosa del Cangrejo. Los residuos contienen los productos de toda la alquimia nuclear que mantuvo el

brillo de la estrella en el pasado: grandes cantidades de oxígeno y carbono, junto con trazas de muchos otros elementos. Las proporciones calculadas son satisfactoriamente cercanas a las proporciones observadas en nuestro sistema solar.

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es como un gran ecosistema. Dentro de las estrellas, el hidrógeno primordial se transforma en las piezas básicas de la vida (carbono, oxígeno, hierro y demás elementos). Parte de este material vuelve al espacio interestelar y se recicla en nuevas generaciones de estrellas.

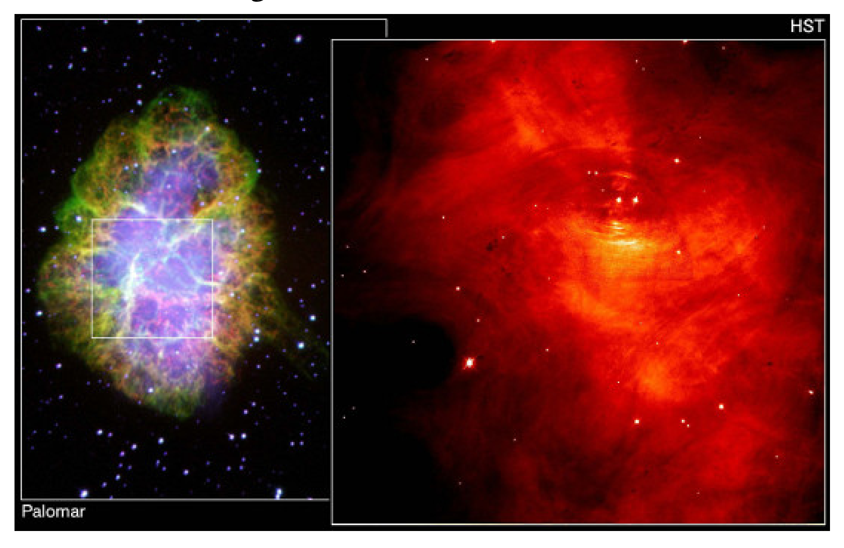


Figura 2. La Nebulosa del Cangrejo. La imagen de la derecha muestra la actividad continuada en la parte central de la nebulosa, causada por la estrella de neutrones en rotación (pulsar) que quedó tras la explosión.

Un átomo de carbono formado en una supernova primordial podría haber deambulado por el espacio interestelar durante centenares de millones de años antes de integrarse en una nube interestelar densa, la cual se habría contraído por efecto de su propia gravedad para formar estrellas. El átomo podría haber ido a parar al núcleo de una nueva estrella masiva para convertirse en un elemento más pesado (silicio o hierro, por ejemplo) y ser expulsado de nuevo en otra explosión de supernova; o podría ha-

berse integrado en una estrella menos masiva, rodeada de un disco de gas en rotación que se habría condensado en una comitiva de planetas, como nuestro Sol. El mismo átomo de carbono podría haber ido a parar a la Tierra primigenia para acabar finalmente en una célula humana. Cada átomo del universo tiene un origen que se remonta hasta mucho antes del nacimiento de nuestro sistema solar. Somos, literalmente, las cenizas de estrellas muertas hace mucho tiempo.

Pero ¿cómo surgió nuestra galaxia? ¿De dónde procede el hidrógeno primordial? Para responder a estas cuestiones debemos ampliar nuestros horizontes tanto en el espacio como en el tiempo, hasta el universo de las galaxias.

El universo visible

Las galaxias se mantienen estables en virtud de dos efectos: la gravedad, que hace que las estrellas se atraigan entre sí, y el movimiento de las estrellas que, de no ser por la gravedad, haría que la galaxia se dispersara. En los discos de algunas galaxias, como la de Andrómeda o la propia Vía Láctea, se mueven unos cien mil millones de estrellas en órbitas prácticamente circulares. En las galaxias elípticas, menos fotogénicas, las estrellas describen trayectorias más aleatorias. Las galaxias no se comprenden tan bien como las estrellas. Como veremos, ni siquiera sabemos cuál es su ingrediente principal.

Las galaxias interesan a los cosmólogos porque son «marcadores» para sondear los movimientos y la estructura del universo a gran escala. Ya se han cartografiado unos cuantos miles de galaxias próximas (a menos de 300 millones de años-luz de distancia) en ambos hemisferios. Estas galaxias se distribuyen irregularmente en cúmulos y supercúmulos. ¿Quiere esto decir que hay

cúmulos de cúmulos de cúmulos… *ad infinitum*? No. Si nuestro universo tuviera esa estructura observaríamos más agrupamientos a medida que aumentara la escala. Pero esto no ocurre: aunque está claro que las galaxias relativamente cercanas a nosotros forman agrupaciones, los *millones* de galaxias lejanas se distribuyen uniformemente en el cielo. A medida que observamos galaxias más débiles a distancias cada vez mayores, la agrupación se hace menos evidente y el cielo parece más uniforme.

En otras palabras, podemos estar seguros de que el universo es homogéneo a gran escala. Esto puede aclararse con una analogía terrestre. La superficie del océano muestra estructuras complejas: olas (a veces encabalgadas), espuma, etc. Pero cuando nuestra mirada se extiende más allá de las olas mayores, hasta el horizonte, se puede apreciar una uniformidad global. Una muestra «representativa» de océano debe ser mucho más extensa que las olas más grandes. Nuestro horizonte es lo bastante lejano para abarcar numerosas parcelas estadísticamente similares, cada una lo bastante grande para constituir una «muestra representativa».

Esta uniformidad a gran escala de los paisajes marinos no es, sin embargo, un rasgo general de los paisajes terrestres: en tierra firme podemos observar grandes montañas en la línea del horizonte y un rasgo topográfico singular puede dominar toda la perspectiva. La cosmología es, por definición, el estudio del universo entero. Sólo podemos observar un único universo, aunque es probable que sólo sea una pequeña parte de todo lo que existe. La cosmología ha progresado a pesar de estas limitaciones, pero sólo porque el universo observable (el volumen limitado por nuestro «horizonte» observacional) se parece más a un paisaje marino que a un paisaje montañoso. El mayor de los supercúmulos de galaxias es pequeño en comparación con el alcance de nuestros potentes telescopios.

Edwin Hubble fue el primero en advertir que el movimiento general de nuestro universo también es simple. Las galaxias lejanas se alejan de nosotros a velocidades proporcionales a su distancia, como si hubieran estado todas apelotonadas hace entre diez y quince mil millones de años.

Mucho más lejos, cada vez más cerca de nuestro horizonte observacional, se divisan regiones que emitieron su luz cuando el universo estaba aún más comprimido (figura 3).

Los astrónomos pueden *ver* el pasado remoto. Las imágenes de los telescopios revelan un número incontable de galaxias muy tenues, tan lejanas que emitieron su luz antes de la formación de nuestro sistema solar. Más lejos aún se encuentran los *cuásares*, núcleos hiperactivos de un tipo especial de galaxias, tan brillantes que hacen palidecer la luz de los 100.000 millones de estrellas que los rodean. La «distancia récord» la ostenta un cuásar cuya luz está tan desplazada al rojo que la línea Lyman-alfa de 1216 A, el rasgo más característico del espectro ultravioleta del hidrógeno, se observa en la parte roja del espectro, cerca de los 7200 A. La razón entre la longitud de onda observada y la emitida (5,9) nos informa de cuánto se ha expandido el universo desde que ese cuásar emitió la luz que nos llega ahora.

Pruebas de una gran explosión

Los cuásares son reliquias de un tiempo en el que las galaxias aún eran jóvenes, quizá de cuando empezaron a formarse. Pero ¿qué sucedió antes de eso? ¿Empezó todo con una gran explosión? Esta idea fue formulada por primera vez por el sacerdote católico belga Georges Lemaître en 1931. Fue Fred Hoyle quien introdujo la expresión «Big Bang» (gran explosión) como una descripción burlona de una idea que nunca le gustó.

Pero el lema cayó en gracia, y la confirmación de esta teoría llegó en 1965, cuando Amo Penzias y Robert Wilson detectaron con su antena de los laboratorios Bell de Nueva York un exceso de ruido de microondas que parecía provenir de todas las direcciones del espacio, sin una fuente puntual evidente. Este hecho tiene una implicación trascendental: el espacio no está totalmente frío, sino que tiene una temperatura de unos 3 kelvin por encima del cero absoluto (-273 grados en la escala centígrada). Esto puede parecer poco, pero implica que hay cerca de mil millones de cuantos de radiación (fotones) por cada átomo del universo.

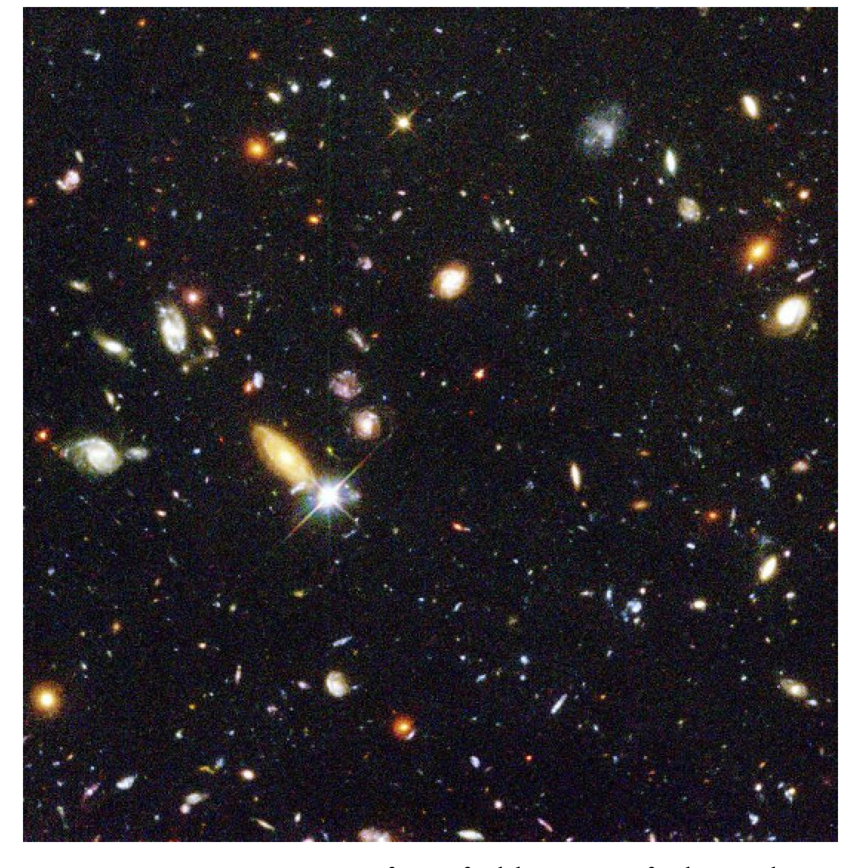


Figura 3. Esta imagen muestra una fotografía del espacio profundo tomada con el telescopio espacial Hubble. A pesar de que sólo muestra una pequeña parte del cielo (cerca de una milésima parte del área cubierta por la Luna), revela cientos de objetos débiles. En su mayoría son galaxias tan lejanas que su luz surgió poco después de que acabaran de formarse.

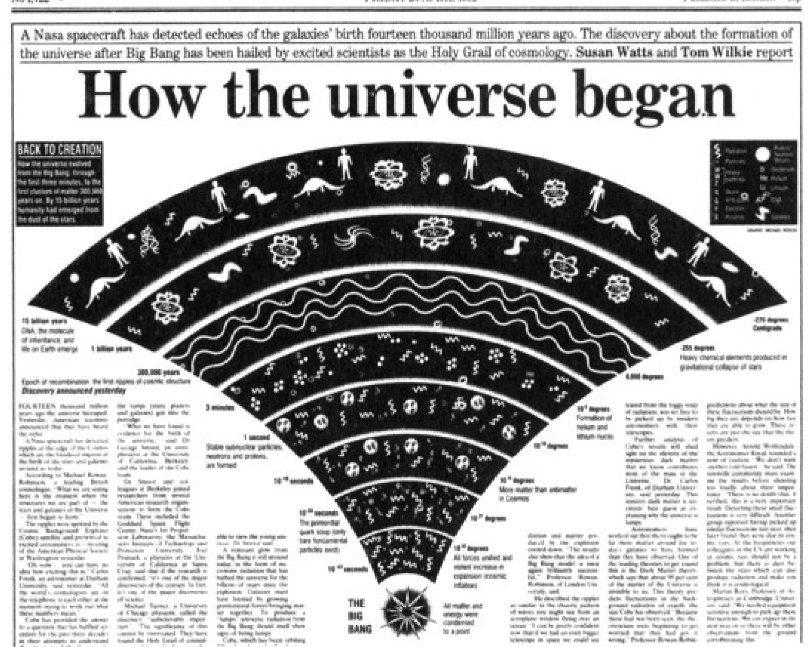
Este «fondo cósmico» produce cerca del 1% del zumbido de fondo de un aparato de televisión. Se trata del calor residual de una era sin galaxias, en la que el universo entero era denso y opaco. Después de expandirse durante cerca de medio millón de años, la temperatura descendió por debajo de los 3000 K y la radiación primitiva se desplazó hacia el infrarrojo. El universo entró en una «edad oscura» que duró hasta que las primeras estrellas de las primeras galaxias, y quizá también los primeros cuásares, alumbraron el espacio de nuevo. La expansión enfrió y diluyó la

radiación, y alargó su longitud de onda. Pero todavía sigue ahí: llena el universo y no puede ir a ninguna otra parte.

Sin embargo, tenemos buenas razones para creer que, antes de eso, la temperatura era no ya de miles de grados, sino de miles de millones, lo bastante para iniciar reacciones nucleares. La rapidez de la expansión no dejó tiempo para que toda la materia se convirtiera en hierro, como sucede en las estrellas calientes. Pero cerca de una cuarta parte se convirtió en helio. El resto, salvo trazas de deuterio y litio, permaneció en forma de hidrógeno.

Es notable que la proporción de helio de las estrellas y nebulosas más viejas, que en la actualidad se determina con un error del 1%, se acerque tanto a la que predicen los cálculos teóricos. Más aún, las proporciones de litio y deuterio también concuerdan con las predicciones. De hecho, estos dos elementos habían sido problemáticos para la hipótesis de la nucleosíntesis estelar que tan bien había funcionado para el carbono, el oxígeno y otros elementos. Todo esto corrobora las extrapolaciones hasta el tiempo en que el universo era lo bastante caliente para que se produjeran reacciones nucleares, cuando sólo tenía *unos pocos segundos de edad*.

Un día de 1992, el que hasta entonces me parecía el mejor periódico británico (*The Independent*) anunció un descubrimiento cosmológico en portada (figura 4). Se mostraba una amplia representación de la evolución cósmica (con dinosaurios y todo; supongo que es el único asunto científico que iguala en popularidad a la cosmología) a partir de los 10^{-43} segundos, el llamado tiempo de Planck, cuando todo estaba tan concentrado que el universo entero estaba sometido a las fluctuaciones cuánticas.



THE INDEPENDENT

No 1,722 FRIDAY 24 APRIL 1992 Published in London 40p

A Nasa spacecraft has detected echoes of the galaxies' birth fourteen thousand million years ago. The discovery about the formation of the universe after Big Bang has been hailed by excited scientists as the Holy Grail of cosmology. **Susan Watts** and **Tom Wilkie** report

How the universe began

Figura 4. La portada de *The Independent* que anunciaba la detección de fluctuaciones angulares en la radiación de fondo por parte del COBE. Estas fluctuaciones, formadas probablemente en la fase «inflacionaria» de la expansión cósmica, fueron las precursoras de las estructuras a gran escala de nuestro universo actual.

¿Podemos creer en la cosmología que divulgan los periódicos? ¿Está evolucionando el universo tal como se representa en este gráfico? En los últimos años, la teoría del «Big Bang» ha recibido nuevos espaldarazos: el satélite COBE (COsmic microwave Background Explorer, explorador del fondo de microondas cósmico) mostró que la radiación de fondo tenía el espectro esperado con un error de una diezmilésima; por otra parte, mediciones más precisas del helio y el deuterio cósmicos han reafirmado los cálculos teóricos. Es más, *podrían* haberse descubierto cosas que habrían invalidado la hipótesis de la gran explosión y *no* ha sido

así. El «Big Bang» ha vivido peligrosamente durante veinticinco años, y ha sobrevivido.

Los fundamentos de la extrapolación hasta *un segundo* después de la creación de nuestro universo (momento en que comenzó a formarse helio) deben tomarse tan en serio como las inferencias relativas a la historia primitiva de nuestro planeta, que se basan en pruebas igualmente indirectas e incluso menos cuantitativas. Hay quien está aún más seguro que yo. El gran cosmólogo soviético Yakov Zeldovich afirmó una vez que la idea de la gran explosión era «tan cierta como que la Tierra gira alrededor del Sol» (seguramente olvidó las palabras de su compatriota Lev Landau, quien sentenció que los cosmólogos «con frecuencia se equivocan, pero nunca dudan»).

Apostaría a que la teoría es correcta al menos en un 90%. Pero la consistencia no garantiza la verdad. Nuestra satisfacción puede ser tan ilusoria como la de un astrónomo ptolemaico que acabara de ajustar un epiciclo.

¿Es absurdo y presuntuoso pretender que lo sabemos *todo* sobre los inicios del universo observable? No es el tamaño lo que dificulta la comprensión de un sistema, sino su complejidad. En la bola de fuego primordial todo debía estar desintegrado en sus constituyentes más simples. El universo primitivo podría ser menos turbador (y más comprensible) que el más sencillo de los organismos vivos. ¡Son los biólogos y los evolucionistas quienes se enfrentan al reto más difícil!

Volveré después al comienzo caliente y denso de nuestro universo y lo que ocurrió en el primer segundo (la parte inferior de la figura 4), pero ahora hagamos de futurólogos en vez de cazadores de fósiles.

Las escalas temporales cósmicas se extienden en el futuro al menos tan lejos como en el pasado. Supongamos que Norteamérica hubiera existido siempre, y que la recorriéramos de costa a costa, partiendo de la costa este cuando la Tierra se formó y acabando en California diez mil millones de años después, cuando el Sol estuviera a punto de morir. Para realizar este viaje tendríamos que dar *un paso cada 2000 años*. Tres o cuatro pasos representarían toda la historia registrada, justo antes de llegar a la mitad del recorrido (quizá en algún lugar de Kansas). ¡Aún quedaría un buen trecho!

Visto así, estamos casi al principio del proceso evolutivo. La progresión hacia la diversidad aún tiene mucho camino por recorrer. Aun cuando la vida estuviera restringida a nuestro planeta, tendría tiempo para propagarse por toda la galaxia, e incluso más allá.

Dentro de unos 5000 millones de años el Sol morirá, y la Tierra con él. Por esas fechas (mil millones de años más o menos), la galaxia de Andrómeda chocará con la Vía Láctea y ambas se fundirán en una galaxia elíptica amorfa. Pero ¿seguirá expandiéndose el universo para siempre, hacia algún tipo de muerte térmica asintótica, o volverá a comprimirse en un *Big Crunch* al cabo de muchísimo tiempo?

Esta predicción de tan largo alcance depende del ritmo de desaceleración de la expansión cósmica. Esta desaceleración se produce porque toda la materia se atrae gravitatoriamente. Es sencillo calcular que la expansión se invertirá si la densidad media del universo es superior a los tres átomos por metro cúbico. El espacio parece estar incluso más vacío: si los átomos de las estrellas y el gas de todas las galaxias se distribuyeran uniformemente, la

densidad de materia no llegaría ni a una cincuentava parte de la «crítica».

A primera vista esto parece asegurar que la expansión será eterna por un amplio margen. Pero la situación no es tan sencilla. Parece ser que existe al menos diez veces más materia «oscura» de la que puede verse directamente. Una prueba de ello procede de la observación de discos de galaxias como la Vía Láctea o Andrómeda. Estas galaxias contienen hidrógeno neutro, que en sí mismo no pesa mucho, pero que sirve como trazador del movimiento orbital. Los radioastrónomos pueden detectar este gas, que se extiende mucho más allá del disco visible, porque emite en una longitud de onda típica de 21 cm. Se ha observado que su velocidad orbital es más o menos la misma en toda su extensión. Pero si las nubes más externas estuvieran sometidas a la atracción gravitatoria de la materia visible, sus velocidades tendrían que disminuir en función de la raíz cuadrada de su distancia a los límites ópticos de la galaxia: el gas periférico se movería más despacio, igual que Neptuno y Plutón se mueven más despacio que la Tierra. La velocidad inesperadamente alta del gas periférico sugiere que estas galaxias están rodeadas por un extenso halo invisible (del mismo modo que, si Plutón se moviera tan rápido como la Tierra, deberíamos deducir la existencia de una capa de materia invisible entre las órbitas de ambos planetas).

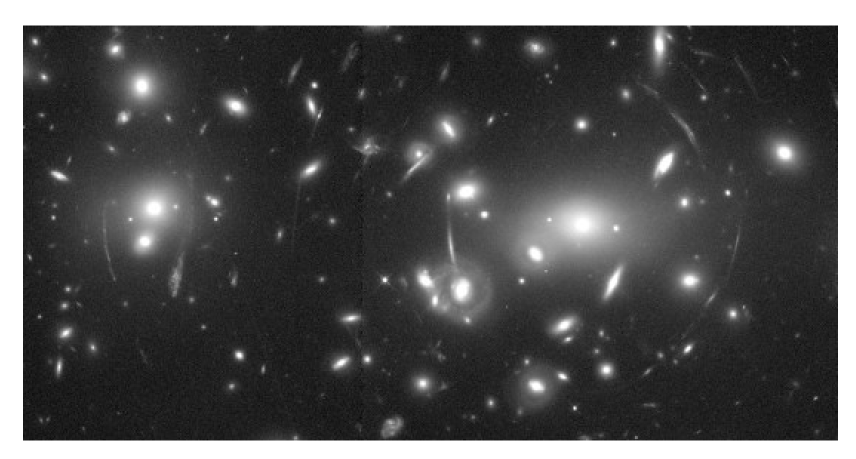


Figura 5. El cúmulo galáctico Abell 2218. Las galaxias más luminosas pertenecen al cúmulo. Las más débiles son galaxias remotas que están detrás del cúmulo, cuyas imágenes están distorsionadas y aumentadas por una lente gravitatoria (un fenómeno por el cual los rayos de luz se desvían a causa de los campos gravitatorios de grandes masas situadas en el eje visual). La intensidad de esta distorsión implica que el cúmulo contiene cerca de diez veces más masa en forma de «materia oscura» que la que detectan los telescopios.

Los cúmulos de galaxias también están repletos de materia oscura. En la figura 5 puede contemplarse uno: los rayos débiles y los arcos son galaxias remotas, mucho más lejanas que el cúmulo en primer término, cuyas imágenes parecen haber pasado a través de una lente. Si observamos la estructura regular del papel pintado de una pared a través de un vaso de cristal, aparece distorsionada. Del mismo modo, la gravedad del cúmulo galáctico desvía los rayos de luz que lo atraviesan. Esta imagen habría fascinado a Fritz Zwicky, aquel excéntrico genial ensalzado por Freeman Dyson en el capítulo anterior. Zwicky fue el primero en darse cuenta, en los años treinta, de que los cúmulos de galaxias se disgregarían a menos que contuviesen una masa superior a la observada; también fue el primero en sugerir la posible observación de lentes gravitatorias. Las galaxias visibles del cúmulo sólo contienen una décima parte de la materia necesaria para producir estas imágenes distorsionadas, lo que constituye una

prueba de que los cúmulos de galaxias, como las propias galaxias, contienen diez veces más masa de la que vemos.

¿En qué consiste esta materia oscura? Quizá sean estrellas débiles, cuyos núcleos no se han comprimido y calentado lo suficiente para encender su combustible nuclear; quizá sean agujeros negros, restos muertos de grandes estrellas que brillaron cuando la galaxia era joven. Pero hay otras posibilidades bien diferentes. El caliente universo primitivo pudo contener no sólo átomos y radiación, sino otras partículas. En concreto, debería haber una cantidad ingente de *neutrinos*, cerca de mil millones por cada átomo del universo. Así, aunque sus masas individuales fueran muy pequeñas, su efecto gravitatorio global sería importante. Pero ¿tienen masa los neutrinos? Experimentos recientes en Los Álamos parecen indicar que sí, pero aún no se puede afirmar con seguridad. Los resultados se publicaron en un artículo firmado por 39 autores pero, en el mismo número de la revista, el autor número 40 publicó un artículo con la conclusión contraria. Así, es prudente suspender el juicio de momento. Si los neutrinos tuvieran la masa que se les atribuye, entonces contribuirían a la masa total del universo más que todas sus estrellas y nubes de gas.

Al menos los neutrinos existen. Los físicos de partículas manejan una larga lista de partículas hipotéticas que, caso de existir, podrían haber sobrevivido desde las fases iniciales de la expansión universal. Si estas partículas llenan nuestra galaxia, habría unas 100.000 por cada metro cúbico, y atravesarían la Tierra sin apenas interaccionar con la materia. Pero su sección eficaz de colisión con los átomos ordinarios, aunque muy pequeña, no es nula, y se están preparando experimentos sensibles para detectar estos sucesos tan poco comunes. El equipo debe instalarse a gran profundidad para reducir otras señales de fondo. Un equipo bri-

tánico está preparando un experimento de este tipo en una mina de Yorkshire. Es un proyecto difícil pero, si tuviera un resultado positivo, no sólo revelaría cuál es la composición del 90% de nuestro universo, sino nuevos tipos de partículas indetectables de otra manera.

No debe sorprendernos que exista materia oscura. Nada obliga a que toda la materia del universo tenga que ser luminosa. Lo difícil es decidir entre los muchos candidatos. Su preponderancia puede rebajar aún más nuestro estatuto cósmico. Copérnico destronó a la Tierra de su posición central en el universo. Hubble mostró que el Sol no estaba en un lugar especial. Ahora le toca al chovinismo de las partículas. Nuestros cuerpos, así como todas las estrellas y galaxias, serían tan solo unas ínfimas motas en un universo cuya estructura a gran escala estaría controlada por la gravedad de una materia oscura de naturaleza bien distinta. El universo visible podría compararse con la espuma blanca en las crestas de las olas, más que las olas mismas.

Sabemos que la materia oscura de galaxias y cúmulos existe, pero también sabemos que no es suficiente para detener la expansión cósmica. Sin embargo, hay un amplio consenso en que el universo tiene una densidad exactamente igual a la crítica o quizá mayor, de modo que la extensión de su espacio-tiempo es finita. Los que compartimos esta presunción teórica trasladamos el peso de la prueba a los que no creen que pueda haber mucha más materia oscura escondida *entre* los cúmulos galácticos.[9]

Hablaré ahora de cómo surgieron las galaxias y los cúmulos. Una pregunta habitual es cómo pudo empezar el universo en equilibrio térmico, como una densa bola de fuego, y estar ahora tan visiblemente lejos del equilibrio: el rango de temperaturas del universo actual abarca desde las abrasadoras superficies de las estrellas (y sus núcleos aún más calientes) hasta el espacio profun-

do, a sólo tres grados por encima del cero absoluto. Esta observación parece contradecir la intuición termodinámica de que las temperaturas tienden a equilibrarse cuando los sistemas evolucionan. Sin embargo, se trata de un resultado natural de la expansión cósmica y de la acción de la gravedad.

La gravedad tiene la tendencia singular de llevar a los sistemas fuera del equilibrio. Los sistemas gravitatorios que pierden energía se *calientan*. Una estrella que pierde energía se contrae y, para que se establezca un nuevo equilibrio en el que la presión compense la fuerza gravitatoria (que ahora es más intensa), la temperatura del núcleo debe *aumentar*.

Otro efecto de la gravedad es hacer que el universo en expansión se inestabilice, de modo que irregularidades iniciales muy pequeñas producen a la larga notables contrastes de densidad que permiten el crecimiento de estructuras. Los físicos teóricos están simulando estos procesos por ordenador con un detalle cada vez mayor. Se introducen pequeñas fluctuaciones al principio de la simulación, con parámetros que dependen de las hipótesis cosmológicas que se asumen. La figura 6 muestra tres «instantáneas» de la simulación de una región que contiene unos pocos miles de galaxias, lo bastante grande para constituir una muestra representativa de nuestro universo. A medida que la expansión avanza, las regiones ligeramente más densas que la media van rezagándose, hasta que dejan de expandirse y se condensan en forma de protogalaxias gaseosas, que a su vez se diferencian en estrellas. La repetición de este proceso a mayores escalas crea los cúmulos y supercúmulos. Estas simulaciones sirven para contrastar diferentes hipótesis sobre las fluctuaciones iniciales, la materia oscura y otras características, y para comprobar cuáles conducen a un patrón más parecido a una muestra típica del universo real.

La radiación de fondo es un vestigio de un universo anterior a las galaxias que no era perfectamente homogéneo y, por lo tanto, tiene que haber conservado señales de las fluctuaciones iniciales. Esta radiación procede de un horizonte muy distante, mucho más alejado que los cuásares, que se ha expandido sin trabas desde mucho antes de que se completara la formación de los cúmulos de galaxias. La radiación de un cúmulo incipiente en esta superficie se observaría como una zona ligeramente más fría, porque la atracción gravitatoria de una región más densa que la media se traduce en una pérdida de energía. En cambio, la radiación procedente de una zona de vacío incipiente sería un poco más caliente. En cualquier caso, las diferencias entre las temperaturas de ambas regiones serían muy pequeñas, inferiores a una cienmilésima.

El satélite COBE de la NASA fue el primero en detectar estas inhomogeneidades de temperatura. La medición de unas variaciones tan débiles fue una hazaña tecnológica, pero no un resultado inesperado. Hubiera sido más desconcertante no observarlas. Esto habría implicado un universo primitivo tan homogéneo como incompatible con las agrupaciones cósmicas existentes en el presente. En tal caso habríamos tenido que postular algún proceso más eficiente que la gravedad para explicar todas las estructuras que vemos.

El COBE obtuvo los primeros resultados positivos. Otras mediciones en la superficie terrestre o mediante globos sonda los están completando y ampliando, y se están proyectando dos nuevos experimentos espaciales. Los embriones de las galaxias y otras estructuras cósmicas mayores ya no son entidades hipotéticas, sino realidades objetivas.

Si tuviera que resumir la evolución del universo desde la gran explosión, diría (tras respirar profundamente): «Desde el origen,

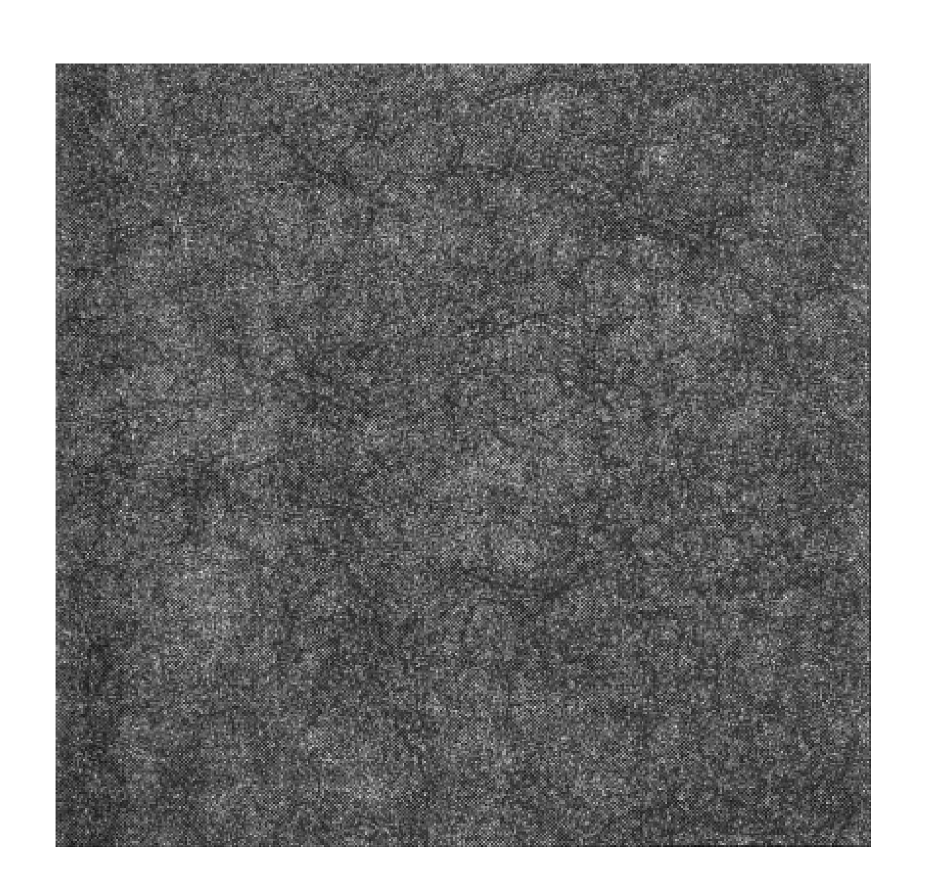
los efectos de la gravedad, contrarios al equilibrio termodinámico, han amplificado las inhomogeneidades y creado gradientes de temperatura cada vez mayores, un prerrequisito para la emergencia de la complejidad que hoy, diez mil millones de años después, nos envuelve y de la cual formamos parte».

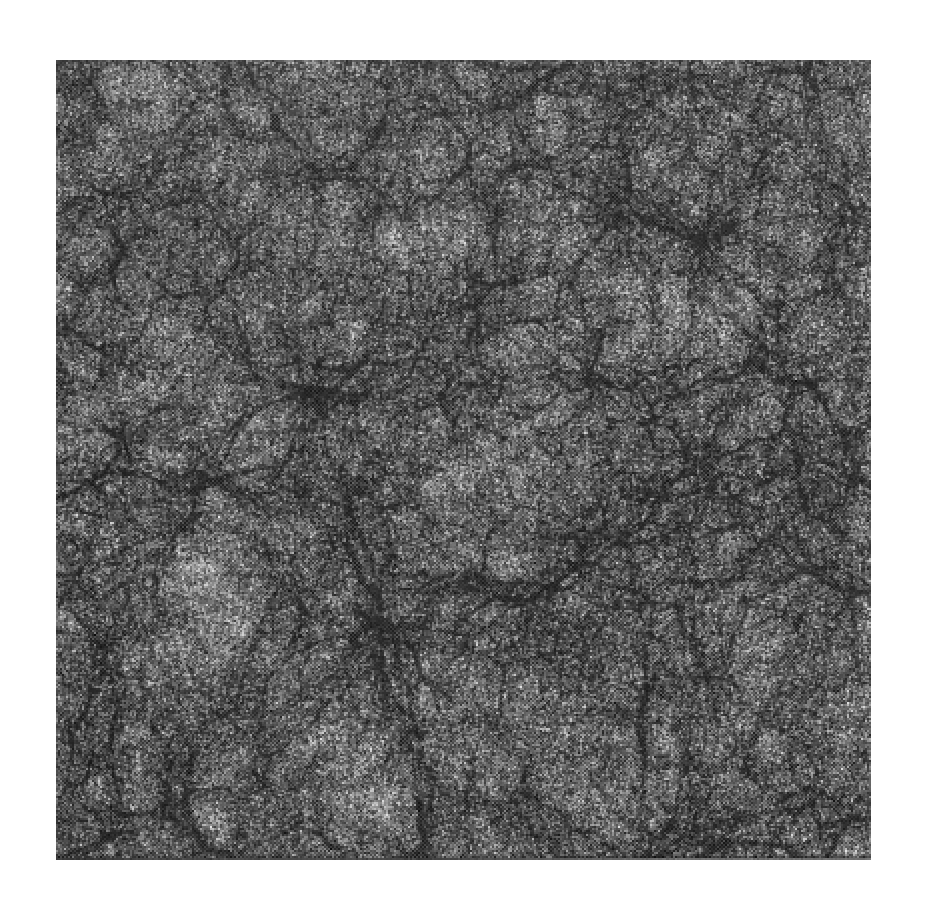
La evolución de las estructuras cósmicas es tan predecible como las órbitas de los planetas, que comprendemos desde los tiempos de Newton. Pero algunas características del sistema solar eran un misterio para el autor de los *Principia*. Newton demostró el movimiento elíptico de los planetas, pero no sabía por qué giraban todos en el mismo sentido ni por qué sus órbitas tendían a situarse en un mismo plano. En su libro *Optica*, escribió:

> El ciego destino no podría hacer que los planetas se moviesen en el mismo sentido y en órbitas coplanarias… Una uniformidad tan maravillosa en el sistema planetario debe ser resultado de alguna voluntad.

Ahora entendemos esta coplanariedad como una consecuencia natural de la formación de nuestro sistema solar a partir de un disco protoestelar en rotación.

Distinguir los fenómenos que son resultado de leyes conocidas de los derivados de «condiciones iniciales» misteriosas resulta hoy tan difícil como en tiempos de Newton. Hasta cierto punto, aún nos limitamos a decir que «las cosas son como son porque fueron como fueron». Lo que el progreso científico ha permitido es trasladar la cuestión más allá del origen del sistema solar, hasta el primer segundo después de la gran explosión.





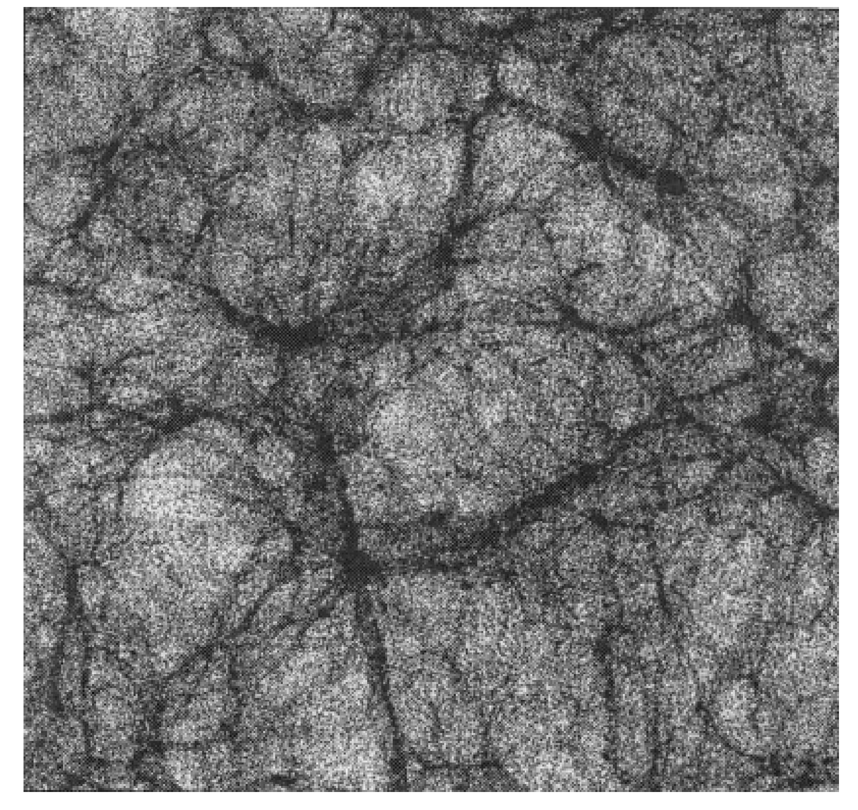


Figura 6. Estos tres «fotogramas» muestran tres etapas en el desarrollo de agrupaciones en un universo en expansión (simulación obtenida por el consorcio Virgo). La escala está ajustada para que cada imagen muestre la misma cantidad de masa (que, por supuesto, habría estado más comprimida en etapas más primitivas de la expansión). La región mostrada tendría unos 300 millones de años luz de diámetro.

Así como Newton tuvo que especificar las trayectorias iniciales de cada planeta, nuestros cálculos de la estructura cósmica requieren especificar unos pocos números:

1. La velocidad de la expansión.
2. Las proporciones de átomos ordinarios (o de sus quarks constituyentes), materia oscura y radiación.
3. La amplitud de las fluctuaciones, que deben ser lo bastante grandes para producir estructuras, pero no tanto como para destruir la uniformidad global.

¿Podemos explicar estos números en términos de procesos que ocurrieron antes incluso del punto de partida de las simulaciones? El problema es que cuanto más nos remontamos en el tiempo menos podemos fiarnos de la física al uso. En el primer milisegundo, la densidad del universo era mayor que la del núcleo de un átomo. En los primeros 10^{-14} segundos, la energía de cada partícula sobrepasaría la obtenible con el nuevo acelerador del CERN (Centre Européene pour la Recherche Nucleaire).

Ni siquiera los físicos teóricos más audaces pueden remontarse hasta la fase en que los efectos cuánticos afectaban al universo entero. La física del siglo XX se sustenta en dos grandes pilares: la teoría einsteiniana de la gravedad (la relatividad general) y el principio de incertidumbre cuántico. En general, estos dos grandes conceptos no se solapan: la gravedad es desdeñable a escala molecular, donde dominan los efectos cuánticos; y a la inversa, los sistemas gravitatorios (planetas y estrellas, por ejemplo) son tan grandes que los efectos cuánticos pueden ignorarse a la hora de calcular sus movimientos. En el nacimiento del universo, las densidades habrían sido tan altas que los efectos cuánticos habrían sido relevantes para el sistema entero. Esto sucede en el tiempo de Planck, a los 10^{-43} segundos después de la gran explosión.

La historia del cosmos puede dividirse en tres eras. La primera, el primer milisegundo, es una era fugaz pero llena de acontecimientos, que abarca 40 órdenes de magnitud a partir del tiempo de Planck. Éste es el hábitat intelectual de los físicos de altas energías y los cosmólogos cuánticos. La segunda era va del primer milisegundo hasta un millón de años después de la gran explosión. En esta era los empiristas cautos como yo nos sentimos más seguros. Las densidades son ya muy inferiores a la del núcleo atómico, pero el universo se expande todavía de manera muy

homogénea. La teoría está corroborada por datos cuantitativos (la abundancia de helio cósmico, la radiación de fondo, etc.) y la física relevante ha sido convenientemente verificada en el laboratorio. La segunda parte de la historia cósmica, aunque corresponda a un pasado remoto, es la más fácil de comprender. Sin embargo, el universo sólo es tratable mientras permanece amorfo y desestructurado. La tercera era, que es el dominio de los astrónomos tradicionales, empieza cuando las primeras estructuras gravitatorias se condensan (cuando se forman y empiezan a brillar las primeras estrellas, galaxias y cuásares). Aquí presenciamos manifestaciones complejas de leyes físicas bien conocidas. La gravedad, la dinámica de los gases y los ciclos de las estrellas se combinan para dar origen a la complejidad que nos envuelve y de la que somos parte. La tercera parte de la historia cósmica es difícil de estudiar por lo mismo que hace complicadas las ciencias medioambientales, desde la meteorología hasta la ecología.

Así pues, los números básicos que determinaron la evolución de nuestro universo son un legado de la incierta física de la primera era. Lo que esto implica es que las propias leyes físicas pudieron quedar determinadas en las primeras fases del universo primitivo. Pero antes de discutir esta cuestión quiero advertir que voy a adentrarme en un terreno especulativo, donde hasta el mismo Zeldovich tendría algunas dudas.

En primer lugar, ¿qué sucede con la velocidad de expansión inicial? Tiene que estar ajustada con mucha precisión. Las dos escatologías posibles (la expansión perpetua o la compresión en un «Big Crunch») parecen muy diferentes, pero nuestro universo sigue expandiéndose después de diez mil millones de años. Si la expansión se hubiera frenado antes, no habría habido tiempo de que las estrellas evolucionaran. Es más, si hubiera vuelto a comprimirse después de menos de un millón de años, habría perma-

necido opaco, lo que habría excluido cualquier desequilibrio termodinámico. Por otra parte, la velocidad de la expansión no puede ser mucho mayor que la crítica, porque en tal caso la energía cinética habría vencido a la gravedad y las nubes de gas no habrían podido condensarse en galaxias.

En términos newtonianos, las energías cinética y potencial teníann valores iniciales muy cercanos. ¿A qué se debe esto? ¿Por qué el universo tiene la uniformidad a gran escala que requiere el progreso de la cosmología?

Todo esto pudo deberse a un suceso extraordinario que tuvo lugar en los primeros 10^{-36} segundos, cuando todo el universo observable se reducía a unos pocos centímetros de diámetro. Desde entonces, la expansión cósmica ha estado *desacelerándose* a causa de la atracción gravitatoria entre las distintas partes del universo. Pero los físicos teóricos han ofrecido argumentos serios (aunque, al menos por el momento, especulativos) en favor de la existencia de un nuevo tipo de «repulsión cósmica» que superaría ampliamente a la gravedad «ordinaria» a las enormes densidades del universo primitivo. En esa fase ultradensa la expansión se habría *acelerado* exponencialmente, de modo que el universo embrionario se habría inflado hasta que, a los 10^{-36} segundos de edad, alcanzó un estado homogéneo caracterizado por un balance ajustado entre la energía cinética y la gravitatoria.

La idea de que el universo pasó por una fase inflacionaria es atractiva y convincente. Las fluctuaciones que dieron lugar a los cúmulos y supercúmulos, y las aún mayores que se dibujan en la radiación de fondo, pueden ser el resultado de fenómenos cuánticos microscópicos procedentes de una época muy remota en la que el universo estaba comprimido en un volumen menor que el de una pelota de golf. Por supuesto, no conocemos la física que regía en aquel tiempo tan remoto, pero hay perspectivas

reales de investigarla. Los modelos inflacionarios hacen predicciones concretas sobre entidades observables como las agrupaciones a gran escala y las pequeñas inhomogeneidades de la radiación de fondo cósmica. Pronto seremos capaces de cotejar la era inflacionaria con *pruebas empíricas efectivas*, del mismo modo que las abundancias de helio y deuterio nos informan de las condiciones físicas en los primeros segundos de vida del universo.

También se están buscando otros fósiles singulares del universo primordial conjeturados por los físicos teóricos, como los monopolos magnéticos o agujeros negros del tamaño de un átomo y la masa de una montaña. Más asombrosas aún son las cuerdas cósmicas, bucles elásticos de energía concentrada, más finos que una partícula elemental, pero lo bastante largos para abarcar todo el universo. Las cuerdas cósmicas oscilarían a una velocidad cercana a la de la luz, y serían tan pesadas que su gravedad podría afectar a galaxias enteras. Serían auténticos enlaces entre el cosmos y el microcosmos.

A propósito, la teoría inflacionaria también sugiere que la densidad cósmica media es muy cercana al valor crítico que separa la expansión perpetua de la compresión final. En esto se apoya la presunción que he comentado antes de una densidad igual a la crítica.

En cierto sentido, el universo tiene una energía neta nula. Cada átomo tiene la energía correspondiente a su masa en reposo (la einsteiniana mc^2) más una energía potencial negativa causada por el campo gravitatorio del resto del universo, que equilibra exactamente su masa en reposo. Se puede decir, por lo tanto, que la expansión de la masa y la energía de nuestro universo «no cuesta nada».

Los físicos expresan a veces ideas como ésta diciendo que el universo surgió esencialmente «de la nada». Pero deben vigilar su

lenguaje, sobre todo cuando hablan con filósofos. El vacío de los físicos es una entidad más rica que la «nada» filosófica, puesto que contiene todas las fuerzas y partículas en forma latente.

Es evidente que cualquier teoría de este tipo es muy difícil de comprobar y, por lo tanto, no debe tomarse demasiado en serio a menos que haya razones de mucho peso para aceptarla. En cualquier caso, esto no puede contestar *por qué existe* un universo. Como dice Stephen Hawking en su *Historia del Tiempo* (1988): «¿Qué es lo que insufla fuego en estas cuestiones? ¿Por qué el universo se tomó la molestia de existir?».

Las características del universo y de todo lo que contiene dependen de las intensidades de fuerzas físicas básicas como la gravedad o el electromagnetismo, que son parte de las «condiciones iniciales».

Ya he mencionado la oposición entre termodinámica y gravedad. Esta fuerza tiene una segunda característica importante: su debilidad extrema. La atracción gravitatoria entre dos protones es menor en 36 órdenes de magnitud que la repulsión eléctrica entre ambos. A escalas astronómicas la gravedad domina porque toda la materia tiene la misma «carga gravitatoria» (no hay cancelación de cargas positivas y negativas como en la electricidad).

Supongamos que formamos una serie de agregados de átomos, cada uno diez veces mayor que el anterior: 10, 100, 1000, etc. El agregado número 24, que contendría 10^{24} átomos, tendría el tamaño de un terrón de azúcar; el agregado número 40 tendría el tamaño de una montaña o un asteroide pequeño. La energía gravitatoria de cada átomo respecto del resto del agregado que lo alberga es proporcional al cociente entre su masa y su radio (M/R). El radio del agregado es proporcional a la raíz cúbica de la masa, de modo que la gravedad es proporcional a la potencia 2/3 del número de partículas. La gravedad parte con una des-

ventaja de 36 órdenes de magnitud, de manera que sólo empieza a competir con la fuerza eléctrica cuando llegamos al agregado número 54 (36 es 2/3 de 54) que contiene 10^{54} átomos y vendría a tener la masa de Júpiter. Cualquier cosa más masiva se comprime por efecto de la gravedad y se convierte en una estrella. La debilidad de la gravedad determina que las estrellas deban ser muy pesadas. En cualquier agregado menor, la gravedad no puede comprimir el material hasta densidades y presiones lo bastante altas para desencadenar la fusión nuclear.

Imaginemos ahora un universo hipotético cuya gravedad fuera 10^{10} veces más débil que la nuestra («sólo» 26 en lugar de 36 órdenes de magnitud más débil que las fuerzas eléctricas) sin que cambiara la física del microcosmos. En un universo así, los átomos y las moléculas se comportarían como en el nuestro, pero los objetos no necesitarían ser tan grandes para que la gravedad se dejara notar. Así, en nuestro universo imaginario habría estrellas 10^{15} veces más ligeras que nuestro Sol, cuyas vidas serían de cerca de un año.

El efecto (literalmente) aplastante de una gravedad intensa limitaría el alcance de la evolución de la complejidad en este mundo hipotético. Ninguna planta ni animal de cualquier planeta lo bastante grande para retener una atmósfera podría ser mayor que un insecto y necesitaría patas muy gruesas para sostenerse. Otra limitación aún más severa sería la del tiempo. Los procesos químicos y metabólicos dependen de la microfísica y no podrían acelerarse. En consecuencia, el mini-sol agotaría su energía antes de que la evolución orgánica hubiera dado sus primeros pasos.

Si la gravedad fuera más intensa, habría pocos órdenes de magnitud entre las escalas temporales *astrofísicas y* las escalas temporales microfísicas de las reacciones físicas y químicas. Paradóji-

camente, cuanto más débil es la gravedad (siempre que no sea nula), mayores y más complejas son sus consecuencias.

Nuestro entorno cósmico es extremadamente dependiente de otras constantes físicas. Por ejemplo, si los protones tuvieran cargas eléctricas ligeramente mayores, no habría átomos mayores que el hidrógeno, y la química sería una disciplina muy sencilla. Es más, si pudiéramos cambiar las constantes físicas apretando una serie de botones, la mayoría de combinaciones daría universos «abortivos» cuyas leyes físicas no permitirían la emergencia de la complejidad. Por ejemplo, estos universos podrían no desviarse nunca del equilibrio termodinámico o (debido a una gravedad muy intensa) existir durante un tiempo demasiado corto, o tener sólo dos dimensiones espaciales. ¿Qué consecuencias tiene este argumento? Sus implicaciones dependen, en líneas generales, de la naturaleza de la teoría final (si es que hay alguna). Existen dos hipótesis enfrentadas.

La primera, que llamaré opción A, es que alguna teoría final determine todas las constantes físicas de manera que todas sean soluciones de alguna ecuación fundamental. Esto implicaría que la física que rige nuestro universo *no podría ser* distinta de la que es. El que los valores de las constantes físicas se encuentren dentro del restringido intervalo que permite la evolución de la complejidad en nuestro mundo de bajas energías sería un hecho bruto. Las complicadas consecuencias derivadas de las ecuaciones fundamentales podrían sorprendernos, pero nuestro asombro no sería menos subjetivo que el de un matemático que se sorprende de las consecuencias intrincadas de un algoritmo simple. (Considérese, por ejemplo, el «conjunto de Mandelbrot»; la receta o algoritmo para construir esta sorprendente estructura se reduce a unas pocas instrucciones, pero codifica una intricada variedad de

estructuras a escalas cada vez más pequeñas.) Cualquier ajuste aparente de las constantes debería considerarse una coincidencia.

Pero existe una opción B alternativa. Podría ser que los números que llamamos constantes de la física no fuesen fijados por la teoría fundamental. Si existiera un «conjunto de universos», cada uno regido por una física diferente, habría algunos cuyas condiciones permitirían la evolución de la complejidad.

Esta segunda opción sería congruente con algunas variantes de la cosmología inflacionaria. Según el cosmólogo ruso Andrei Linde, nuestro universo se extendería mucho más allá de los diez mil millones de años luz que podemos observar. En vez de ser «todo lo que vemos», sería sólo una burbuja unida a otros espacio-tiempos de un conjunto infinito y eternamente recurrente: el metauniverso. Volviendo a mi analogía anterior, el océano puede extenderse mucho más allá del horizonte (aunque esto no implica que se extienda uniformemente hasta el infinito).

De acuerdo con esta idea, las fuerzas físicas y las masas de las partículas elementales serían el resultado de algún tipo de transición de fase, ligada a la fuerza que impulsa la expansión. Las huellas de estas transiciones de fase (las intensidades relativas de las fuerzas actuales) podrían ser hasta cierto punto arbitrarias o «accidentales», como los patrones de cristalización del hielo o el comportamiento de un imán al enfriarse. Las «constantes de la naturaleza» tendrían valores diferentes en otros universos del conjunto.

Si esta representación (muy esquemática) tiene algún sentido, el «ajuste» aparente no debería sorprendemos. Puesto que las constantes fundamentales serían resultado de accidentes aleatorios (opción B), en un metauniverso lo bastante amplio sería inevitable que la física fuese propicia a la evolución de la complejidad en algunos universos particulares del conjunto.

Esto se acerca peligrosamente al llamado argumento antrópico. Por fortuna, no tengo espacio para explayarme sobre este tema, aunque no creo que el principio antrópico sea tan estúpido o vacuo como se le presenta a veces. De hecho, nos invita a sospechar que cualquier teoría final tendrá el carácter permisivo de la opción B y que, por lo tanto, no tiene nada de extraño que exista un universo con características que, «accidentalmente», son justo aquellas que hacen posible nuestra existencia.

Antes he aconsejado no hacer demasiado caso de la cosmología que divulgan los periódicos. A modo de conclusión, intentaré evaluar el estado de la cuestión para ver en qué ideas podemos confiar y cuáles deberíamos dejar de lado (por ahora).

La cosmología ha experimentado un progreso asombroso desde los años en que se debatía acaloradamente la hoy abandonada teoría del estado estacionario. Esta teoría parecía especialmente atractiva porque, de ser correcta, todos y cada uno de los procesos evolutivos (desde el origen de los átomos al de las galaxias) se estarían produciendo ahora mismo en algún sitio y, por lo tanto, serían potencialmente observables e investigables. Se creía que una teoría basada en una gran explosión primordial nunca podría ser científica, porque los procesos clave estarían enterrados en el pasado remoto. Pero ello no quiere decir que tales procesos sean inaccesibles al estudio. Los telescopios pueden observar directamente el 90% de la historia del cosmos, y otras técnicas permiten explorar fases aún más primitivas. En líneas generales, podemos estar seguros de nuestra historia cósmica hasta el primer segundo, momento en que se crearon los primeros elementos químicos (lo cual marca el inicio de la que he llamado segunda era de la historia cósmica). El reto actual es precisar de qué manera una bola de fuego prácticamente homogénea surgida hace

diez mil millones de años ha dado lugar al universo del que formamos parte.

La última ilustración (figura 7) muestra a Einstein, pero no el sabio benigno y despeinado que vemos en pósteres y camisetas, sino el joven Einstein. Una de sus frases más célebres es: «Lo más incomprensible del universo es que sea comprensible». La cosmología ha progresado porque las leyes de la física que estudiamos en el laboratorio se aplican hasta el quásar más remoto y se remontan hasta los primeros segundos después de la gran explosión. Las inferencias cosmológicas son más frágiles cuando no existe una conexión firme con la ciencia experimental. Cuando nos aventuramos más allá del primer milisegundo nos adentramos en arenas movedizas, y no deberíamos ocultarlo. Nuestra metodología ya no es como la de un geólogo o cualquier otro practicante de otras ciencias históricas: para progresar ya no podemos aplicar la física conocida, sino que debemos descubrir una nueva física fundamental.

Me intranquiliza que las ideas sobre el universo primordial se presenten en los libros de divulgación con el mismo tono que la ley de Hubble o el fondo de microondas. Existe el riesgo de que lectores demasiado crédulos acepten sin discusión lo que no pasan de ser especulaciones provisionales o, por el contrario, de que otros lectores más escépticos pasen por alto la larga lista de observaciones bien establecidas que apoya nuestro conocimiento de etapas más recientes de la evolución cósmica.



Figura 7. El joven Einstein.

Algunas cuestiones que antes eran especulativas están ahora dentro del alcance de la ciencia seria. En el universo primordial los misterios del cosmos y el microcosmos se entrecruzan. Procesos ocurridos a los 10^{-36} segundos de la gran explosión pueden ser los responsables del exceso de materia sobre la antimateria, las ondulaciones en el tejido del espacio-tiempo y quizá las leyes físicas mismas.

La cosmología moderna ha sido moldeada por su entorno cultural e impulsada por la incorporación de científicos (físicos de

partículas, por ejemplo) con diferentes aptitudes y estilos. También ha sido moldeada por las posibilidades y limitaciones de las técnicas disponibles, sean experimentales, observacionales o de cálculo. Esta dimensión sociológica es fascinante por sí misma. Sin embargo, no debería oscurecer lo que a los que estamos en este «zoo» nos parece lo fundamental de nuestra ciencia: que es una empresa colectiva y acumulativa que, aunque de forma espasmódica, está proporcionándonos una imagen cada vez más nítida y «verdadera» del funcionamiento del cosmos.

BIBLIOGRAFÍA

Audouze, J. y G. Israel (eds.), *The Cambridge Atlas of Astronomy* 3ª. edición, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

Barrow, J., *The Origin of the Universe*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1995. [Trad. esp.: *La trama oculta del universo*, Crítica, Barcelona, 1996.]

Begelman, M. y M. Rees, *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, W. H. Freeman, Nueva York, 1995.

Rees, M., *Perspectives in Astrophysical Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

Rees, M., *Befare the Beginning. Our Universe and Others*, Simon & Schuster, Londres, 1997. [Trad. esp.: *Antes del principio*, Tusquets Editores (Metatemas 57), Barcelona, 1999.]

Silk, J., *A Short History of the Universe*, W. H. Freeman, Nueva York, 1995.

Créditos de ilustraciones

Capítulo 1

Figura 1 DAR225/120. Por Leonard Darwin (1878). Reproducida con permiso del síndico de la biblioteca universitaria de Cambridge.

Figura 2. Reproducida con permiso del presidente y el consejo de la Royal Society.

Capítulo 2

Figuras 1, 3, 4 y 5. L. Wolpert (ed.) *Principies of Development*, Current Biology Ltd, Londres, 1997. Reproducidas con permiso.

Figura 2. D'Arcy W. Thompson, *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge, 1942. Reproducida con permiso.

Figuras 6 y 7. M. Akam, P. Holland, P. Inghain y G. Wray. (eds.), «The evolution of developmental mechanisms», *Development Supplement* 1994. Reproducidas con permiso de Company of Biologists Ltd.

Figura 8. L. Wolpert, *Development Supplement* 7 (1992), págs. 7-13. Reproducida con permiso de Company of Biologists Ltd.

Capítulo 3

Figura 1. J. M. Diamond, *Guns, Germs and Steel*, fig. 10. L. W. W. Norton, Nueva York, 1997. Reproducida con permiso.

Capítulo 4

Figura 1. Reproducida con permiso de Cambridge University Collection of Air. Fotografías: copyright reservado.

Capítulo 5

Figura 2. Adaptada de T. Ingold, «People like us: the concept of the anatomically modern human», *Cultural Dynamics* 7 (1995), pág. 211. Con permiso de Sage Publications Ltd.

Capítulo 8

Figura 1. Cortesía del Dr. Christopher Burrows, ESA/STScI and NASA. UK HST Support Facility.

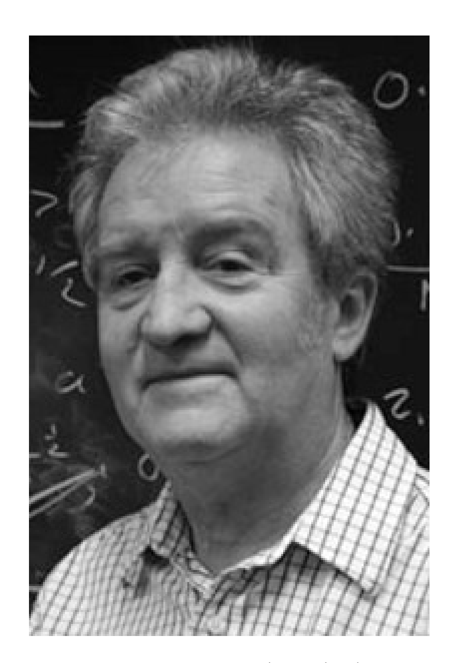
Figura 2. Cortesía de Jeff Hester y Paul Scowen, de la Universidad del estado de Arizona y la NASA. UK HST Support Facility.

Figura 3. Cortesía de Robert Williams, Hubble Deep Field Team (STScI) y la NASA. UK HST Support Facility.

Figura 4. *The independent*, 24 de abril de 1992. Reproducido con permiso de Susan Watts y Tom Wilkie.

Figura 5. Cortesía de W. Couch (Universidad de Nueva Gales del Sur) y R. Ellis (Universidad de Cambridge), y de la NASA.

Figura 7. Reproducida con permiso de los Archivos Albert Einstein, la Biblioteca Nacional y Universitaria Judía y la Universidad Hebrea de Jerusalén, Israel.



ANDREW C. FABIAN, animador de los encuentros que dieron lugar a este volumen, se encargó también de la edición de la primera recopilación de artículos de las conferencias del Darwin College, *Origins* (1989). Es miembro de la Royal Society británica, catedrático de investigación en la Universidad de Cambridge y miembro del Darwin College. Astrónomo, sus investigaciones se centran en las galaxias activas y los cúmulos galácticos.

Notas

[1] Gould se refiere a la invasión de Inglaterra por los normandos que, tras la batalla de Hastings, pasaron a dominar el país. (*N. del T.*) <<

[2] En inglés, la palabra *design* se refiere tanto a «diseño» como a «designio», lo que produce una ambigüedad que no siempre puede mantenerse en la traducción. (*N. del T.*) <<

[3] Pero en el hemisferio sur, por supuesto (*N. del T.*) <<

[4] Este artículo está escrito antes de 1997, año en que el partido laborista accedió al poder y se comprometió a restaurar el consejo de Londres. (*N. del T.*) <<

[5] Esta digresión sobre la etimología y las acepciones de la palabra sociedad es igualmente válida en castellano. (*N. del T.*) <<

[6] La isla de Tasmania. (*N. del T.*) <<

[7] En inglés en el original. (*N. del T.*) <<

[8] La magnitud de un objeto celeste da cuenta de su luminosidad, pero se mide en una escala invertida: los objetos de mayor magnitud son los menos luminosos. Así, cuando se dice que SDSS obtiene imágenes de objetos *por debajo* de cierta magnitud se refiere a que SDSS fotografía objetos con una luminosidad mayor que cierto límite. (*N. del T.*) <<

[9] Observaciones recientes parecen contradecir este supuesto. Las últimas mediciones de la densidad del cosmos abonan la idea de un universo «abierto». (*N. del T.*) <<

ÍNDICE

Evolución. Sociedad, ciencia y universo 2
Introducción 4
Sobre la transmutación de la ley de Boyle en la revolución darwiniana 9
Continuidad adaptativa 9
La formulación de Boyle 16
Continuidad de la adaptación entre la teología natural de Boyle y el darwinismo 23
«Cuentos de así fue», cuyo criterio principal no es tanto el soporte empírico como la habilidad dialéctica 24
Cambio de paradigma tras falsación 27
La diferencia radical entre el adaptacionismo evolucionista (es decir, el darwiniano) y el creacionista 30
La importancia de considerar las alternativas 33
Bibliografía 39
La evolución del desarrollo celular 41
La evolución como modificación del desarrollo 41
Desarrollo 43
La especificación del diseño corporal 49
Alas y extremidades 52
Conservación de los mecanismos del desarrollo 54
El origen del embrión 56
Gastrulación 64
Conclusiones 67
Bibliografía 68

La evolución de los gérmenes y las armas de fuego 69
Ni progreso ni CI 72
Europa y el Nuevo Mundo: factores inmediatos 74
Europa y el Nuevo Mundo: factores últimos 77
La historia de África 82
La historia de Australia 87
Conclusiones y perspectivas 92
Bibliografía 93
La evolución de Londres 95
Una ciudad monofuncional 98
Londres: un metabolismo en evolución 100
La decadencia de Londres, 1975-1995 101
Los muelles: una oportunidad perdida o un futuro sostenible 102
Tráfico, congestión y transporte público 104
Espacios públicos y rotondas 107
El Támesis, un recurso infrautilizado 108
Una estrategia urbana compacta 111
Londres: fundamentos para un desarrollo sostenible 114
Bibliografía 116
La evolución de la sociedad 117
Evolución 117
Sociedad 123
La ciencia y el cazador-recolector 131
De la evolución a la historia 138
Bibliografía 143
La evolución de la novela 146
Las ideas reflejadas en la teoría evolutiva de Darwin 152

El lugar del ser humano 156
La muerte de lo humano 161
Novelas de primates 165
Bibliografía 168
La evolución de la ciencia 170
Analogías 170
Especiación en los cielos 171
Simbiosis 175
Herramientas y conceptos 178
Bernhard Schmidt y Fritz Zwicky 181
Hotel Vela 184
Astronomía digital 187
Bibliografía 193
La evolución del universo 195
Evolución en el seno de nuestra galaxia 195
Alquimia cósmica 197
El universo visible 201
Pruebas de una gran explosión 203
Futurología 209
Bibliografía 231
Créditos de ilustraciones 232
Autor 234
Notas 235